

國立臺灣大學工學院土木工程學研究所

碩士論文

Graduate Institute of Civil Engineering

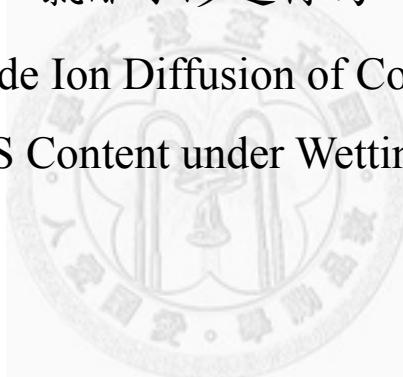
College of Engineering

National Taiwan University

Master Thesis

乾濕循環下不同水膠比及爐石含量混凝土之
氯離子滲透行為

Behavior of Chloride Ion Diffusion of Concrete with various
W/B and GGBFS Content under Wetting-Drying Cycles



林德威

Lin, Te-Wei

指導教授：陳振川 教授

Advisor: Chern, Jenn-Chuan, Ph.D.

中華民國九十九年六月

June, 2010

國立臺灣大學碩士學位論文
口試委員會審定書

乾濕循環下不同水膠比及爐石含量混凝土之

氯離子滲透行為

Behavior of Chloride Ion Diffusion of Concrete with various
W/B and GGBFS Content under Wetting-Drying Cycles

本論文係林德威君（學號 R96521219）在國立臺灣大學土木工程
學系碩士班完成之碩士學位論文，於民國 99 年 7 月 2 日承下列考試委
員審查通過及口試及格，特此證明。

口試委員：

陳振川

陳振川

（指導教授）

詹穎雯

詹穎雯

劉楨業

劉楨業

楊仲家

楊仲家

系主任、所長：呂 良 正

呂良正

誌謝

當撰寫這篇誌謝的時候，也代表了自己將告別學生的身份，即將啟程前往生命的另一個戰場，雖有著完成了一份研究的自豪，同時也帶點感傷；在這三年間經歷的點滴：無論是迷惘的在網路上搜尋著一篇篇的文獻、和老師 Meeting 前的緊張準備、同學間的相互請教討論、挫折時的咬牙苦撐，也都將成為美好的回憶及成長的歷程。

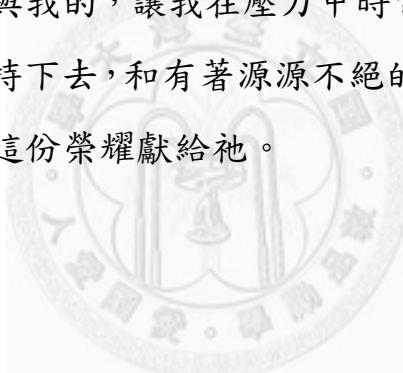
想要先感謝指導老師陳振川教授，從第一年起就開始教授混凝土材料方面的知識，為我們打下良好的基礎，並允許我於研究途中離開一年的時間再回到此研究群中繼續學習；接著感謝詹穎雯教授，願意在繁忙中抽空指導，大至研究架構的訂定，小至論文撰寫及口試呈現的細節，都不厭其煩的耐心提醒指導；感謝劉楨業教授，每週在辦公室與老師的討論讓我的研究能一點一滴的被架構起來，老師對學生展現出的熱情和用心也是令我相當感動；感謝海洋大學楊仲家教授，老師數次對我研究的提醒，以及不吝分享研究的經驗和方法，讓我少走了許多的冤枉路。

接著想感謝教會的弟兄姊妹，在枯燥乏味的研究室生活中，永遠有著你們滿滿的鼓勵，桌上的卡片相片共同經歷的回憶，是支持我繼續堅持很重要的力量，聚會碰面時的關心問候，也能讓我感受到溫暖和深厚的關係；感謝我的女朋友恩惠，很多次犧牲週末可以休息的時間，到實驗室陪我做實驗，甚至用卡片和水果鼓勵我，感謝暉鈞、阿睿、Fish、振嘉還有孟孟，在我製作試體及分析時來給我及時的幫忙，感謝凱平和卓恩願意不遠千里的與我一起到基隆海洋大學將試體分層磨粉，還有感謝正偉、超彥、尚文、小東、阿凱、亮傑、琮炫、東

明對於做研究的經驗心得分享及友情支持，當然還有更多在身邊的弟兄姊妹，會時常幫我加油打氣更替我的需要代為禱告。

謝謝實驗室中許多學長同學在研究時期的提醒和幫助，包括銘智學長、育聖學長和弘斌學長，研究過程中也從彥廷以及海大的彥志那邊得到很多的幫助，還有共同努力的戰友們景涵、柏佑、文伯、陳駿、宜楷、耕甫、顧曦、林穎、韻竹、媧妤、盈儀、羽恬，能一起經歷這生命中最特別的階段並認識你們這些朋友，真的是我最寶貴的收穫。同時也想感謝我的家人老爸、老媽、老弟，給了我很多的支持和安慰，希望我能用這樣小小的成就讓你們感到驕傲。

回想起來就會有好多的感謝從心中湧出，知道所有的這一切都是耶和華我們的神所賜與我的，讓我在壓力中時常保持喜樂的態度，在困難的時候有信心堅持下去，和有著源源不絕的動力及熱情持續在這條道路上前行，願把這份榮耀獻給祂。



摘要

臺灣屬四面環海地形，容易造成鹽分附著在建築物的表面，而鋼筋混凝土結構物易受氯離子的侵蝕，當氯離子突破混凝土保護層而接觸到鋼筋，則會使鋼筋開始鏽蝕，導致結構物強度及服務年限下降。但國內對於氯鹽造成結構物腐蝕影響的參考數據和研究相對較缺乏，本研究主要以鹽霧氣候試驗室來探討混凝土耐久性之試驗，透過加速劣化的過程讓氯離子能迅速的滲入混凝土內部，並分析混凝土於不同配比及爐石摻料取代下的氯離子滲入行為，再利用 Fick 第二定律與試驗結果即可求得氯離子於混凝土中的擴散係數。

由實驗結果可知，若要使氯離子擴散係數降低，可透過降低混凝土水灰比、增加爐石摻料、增加養護時間，透過水泥的水化反應、爐石摻料的卜作嵐反應和顆粒堆積效應，使混凝土試體的孔隙結構更加緻密，氯離子更不易滲入混凝土內部。

一方面可透過加速試驗加速得知鋼筋混凝土接觸到氯離子的劣化反應行為，另一方面與現地試驗結果相互對照，可得到一預測模型，透過實驗所得之氯離子擴散係數來預測現地曝放試體的氯離子滲入行為，提前對結構物做合理服務年限之推估，不過建議若能收集到現地曝放更長期試驗數據，以及增加加速試驗之試驗齡期，則可大幅提升預測之精準度。

關鍵詞：氯離子、爐石混凝土、加速試驗、擴散係數

目錄

誌謝	I
摘要	III
目錄	IV
表目錄	VIII
圖目錄	X
照片目錄	XIV
第一章 緒論	- 1 -
1.1 研究動機與目的	- 1 -
1.2 研究方法與內容	- 2 -
第二章 文獻回顧	- 4 -
2.1 混凝土的孔隙結構	- 4 -
2.1.1 孔隙結構	- 4 -
2.1.2 水泥的水化機理	- 5 -
2.1.3 水灰比與水化時間對孔隙結構的影響	- 6 -
2.1.4 礦物摻料對孔隙結構的影響	- 7 -
2.2 混凝土中的氯離子傳輸行為	- 8 -
2.2.1 氯離子的來源與存在型態	- 8 -

2.2.2 氯離子的傳輸途徑	- 9 -
2.2.3 氯離子擴散係數.....	- 11 -
2.2.4 擴散係數隨齡期之演化.....	- 13 -
2.3 鋼筋腐蝕的原理.....	- 14 -
2.3.1 鹽害成因之判斷：	- 14 -
2.3.2 氯鹽的侵蝕.....	- 15 -
2.4 爐石混凝土之性質	- 17 -
2.4.1 卜作嵐材料.....	- 17 -
2.4.2 爐石的成分性質	- 19 -
2.4.3 爐石的水化反應機理	- 20 -
2.4.4 爐石對混凝土性質的影響	- 21 -
2.5 氯離子耐久性相關試驗.....	- 24 -
2.5.1 氯離子含量的量測	- 24 -
2.5.2 鹽池試驗(Ponding Test)	- 26 -
2.5.3 快速氯離子穿透試驗 (RCPT)	- 26 -
2.5.4 加速氯離子傳輸試驗 (ACMT)	- 27 -
2.6 鹽霧試驗	- 28 -
2.6.1 鹽霧試驗的介紹	- 28 -
2.6.2 電位滴定法.....	- 29 -

2.6.3 混凝土在鹽霧試驗下的行為	- 30 -
第三章 實驗計畫	- 32 -
3.1 實驗內容	- 32 -
3.2 混凝土配比與實驗設計	- 32 -
3.2.1 組成材料	- 32 -
3.2.2 配比設計	- 33 -
3.2.3 實驗變數	- 33 -
3.3 實驗儀器與設備	- 34 -
3.4 試驗內容與方法	- 36 -
3.4.1 混凝土拌合試驗過程	- 36 -
3.4.2 鹽霧試驗試驗過程	- 36 -
3.4.3 分層全斷面磨粉試驗過程	- 37 -
3.4.4 電位滴定試驗過程	- 38 -
第四章 試驗結果與討論	- 40 -
4.1 前言	- 40 -
4.2 實驗乾濕循環條件	- 40 -
4.2.1 水灰比之效應	- 41 -
4.2.2 爐石取代之效應	- 42 -
4.2.3 試驗齡期之效應	- 44 -

4.2.4 預測模式.....	- 45 -
4.3 長期濱海環境曝放條件.....	- 46 -
4.3.1 現地試驗之結果.....	- 46 -
4.3.2 鑽心試體之加速試驗.....	- 47 -
4.3.3 結果之比較.....	- 48 -
4.4 綜合分析比較.....	- 50 -
4.4.1 試驗方法之討論.....	- 50 -
4.4.2 計算方式之討論.....	- 51 -
4.4.3 綜合分析.....	- 52 -
第五章 結論與建議	- 54 -
5.1 結論	- 54 -
5.2 建議	- 56 -
參考文獻	- 58 -

表目錄

表 2-1 波特蘭水泥複合物成分含量【6】	- 66 -
表 2-2 波特蘭水泥成分之特性【6】	- 66 -
表 2-3 鹽害各階段過程劣化的定義【1】	- 66 -
表 2-4 混凝土鹽害階段性的檢測建議項目【1】	- 67 -
表 2-5 卜作嵐材料之化學成分【33】	- 67 -
表 3-1 台泥品牌第 I 型卜特蘭水泥化學成份	- 68 -
表 3-2 台泥品牌第 I 型卜特蘭水泥物理性質	- 68 -
表 3-3 高爐石之物理與化學性質	- 69 -
表 3-4 粗骨材之篩分析與物理性質	- 70 -
表 3-5 細骨材之篩分析與物理性質	- 70 -
表 3-6 試驗配比表	- 71 -
表 3-7 試體編碼表（新拌試體組）	- 71 -
表 3-8 公路局試體配比表	- 72 -
表 3-9 試體編碼表（長期曝放試體組）	- 72 -
表 4-1 新拌試體氯離子濃度分佈試驗結果（一個月）	- 73 -
表 4-2 新拌試體氯離子含量（一個月）	- 73 -

表 4-3 新拌試體氯離子濃度分佈試驗結果（兩個月）	74 -
表 4-4 新拌試體氯離子含量（兩個月）	74 -
表 4-5 新拌試體氯離子擴散係數.....	75 -
表 4-6 新拌試體氯離子擴散係數關係	75 -
表 4-7 齡期與擴散係數關係	76 -
表 4-8 氯離子侵蝕預測日期	76 -
表 4-9 現地曝放試驗氯離子濃度【1】	77 -
表 4-10 公路局試體氯離子濃度分佈試驗結果（一個月）	78 -
表 4-11 公路局試體氯離子含量（一個月）	78 -
表 4-12 公路局試體氯離子濃度分佈試驗結果（兩個月）	79 -
表 4-13 公路局試體氯離子含量（兩個月）	79 -
表 4-14 鑽心試體氯離子擴散係數	80 -
表 4-15 鑽心試體預測侵蝕時間	80 -
表 4-16 各試驗氯離子滲入深度比較	81 -
表 4-17 加速試驗模擬現地試驗關係表	81 -
表 4-18 國內外相關文獻討論比較表	82 -

圖目錄

圖 1-1 混凝土試體試驗項目【1】	- 83 -
圖 2-1 水灰比對滲透性之影響【4】	- 83 -
圖 2-2 水泥熟料單礦物漿體之抗壓強度發展【6】	- 84 -
圖 2-3 粗骨材種類與抗壓強度之關係圖【6】	- 84 -
圖 2-4 典型的深度-氯離子含量圖	- 85 -
圖 2-5 結構表面氯離子濃度（英國、日本、委內瑞拉）【20】 ...	- 85 -
圖 2-6 氯離子擴散係數與暴露時間的關係【25】	- 86 -
圖 2-7 鋼筋混凝土劣化過程【1】	- 86 -
圖 2-8 不同卜作嵐材料強度產生之齡期【33】	- 87 -
圖 2-9 砂灰混凝土之孔隙累積圖【36】	- 87 -
圖 2-10 混凝土添加砂灰與飛灰孔隙直徑與灌入體積圖【37】 ...	- 88 -
圖 2-11 含砂灰與飛灰混凝土養護齡期與孔隙率關係圖【37】 ...	- 88 -
圖 2-12 Metakaolin 與爐石含量比例之最佳強度關係圖【42】 ...	- 89 -
圖 2-13 高爐石生產流程示意圖【41】	- 89 -
圖 2-14 波特蘭水泥與爐石之三相圖【33】	- 90 -
圖 2-15 爐石粉水泥砂漿強度成長趨勢【49】	- 90 -

圖 2-16 爐石粉取代與抗壓強度之關係圖【49】	- 91 -
圖 2-17 爐石粉取代與水膠比之強度關係圖【52】	- 91 -
圖 2-18 乾濕交替之際氯離子滲透的機制【66】	- 92 -
圖 2-19 電位滴定曲線	- 92 -
圖 2-20 現地試驗環境資料統計【2】	- 93 -
圖 3-1 細骨材篩分析曲線	- 94 -
圖 3-2 鹽霧室設定循環	- 94 -
圖 4-1 氯離子含量與深度之關係比較圖（NEW-1）	- 95 -
圖 4-2 氯離子含量與深度之關係比較圖（NEW-2）	- 95 -
圖 4-3 不同水灰比的氯離子濃度關係（NEW-1）	- 96 -
圖 4-4 不同水灰比的氯離子濃度關係（NEW-2）	- 96 -
圖 4-5 爐石取代水泥量與氯離子濃度關係（45-1）	- 97 -
圖 4-6 爐石取代水泥量與氯離子濃度關係（57-1）	- 97 -
圖 4-7 爐石取代水泥量與氯離子濃度關係（45-2）	- 98 -
圖 4-8 爐石取代水泥量與氯離子濃度關係（57-2）	- 98 -
圖 4-9 爐石取代量與氯離子擴散係數關係圖（45-1）	- 99 -
圖 4-10 爐石取代量與氯離子擴散係數關係圖（45-2）	- 99 -
圖 4-11 爐石取代量與氯離子擴散係數關係圖（57-1）	- 100 -
圖 4-12 爐石取代量與氯離子擴散係數關係圖（57-2）	- 100 -

圖 4-13 齡期與氯離子濃度關係 (45-O)	- 101 -
圖 4-14 齡期與氯離子濃度關係 (45-S20)	- 101 -
圖 4-15 齡期與氯離子濃度關係 (45-S40)	- 102 -
圖 4-16 齡期與氯離子濃度關係 (50-O)	- 102 -
圖 4-17 齡期與氯離子濃度關係 (57-O)	- 103 -
圖 4-18 齡期與氯離子濃度關係 (57-S20)	- 103 -
圖 4-19 齡期與氯離子濃度關係 (57-S40)	- 104 -
圖 4-20 245 組各齡期氯離子含量比較	- 104 -
圖 4-21 350 組各齡期氯離子含量比較	- 105 -
圖 4-22 SCC 組各齡期氯離子含量比較	- 105 -
圖 4-23 II 組各齡期氯離子含量比較	- 106 -
圖 4-24 氯離子含量與深度之關係比較圖 (DGH-1)	- 106 -
圖 4-25 氯離子含量與深度之關係比較圖 (DGH-2)	- 107 -
圖 4-26 現地與加速試驗比較圖 (245 組)	- 107 -
圖 4-27 現地與加速試驗比較圖 (350 組)	- 108 -
圖 4-28 現地試驗氯離子滲入深度與試驗齡期之關係	- 108 -
圖 4-29 編號 45-O-1 氯離子含量與深度之關係圖	- 109 -
圖 4-30 編號 45-O-2 氯離子含量與深度之關係圖	- 109 -
圖 4-31 編號 45-S20-1 氯離子含量與深度之關係圖	- 110 -

圖 4-32 編號 45-S20-2 氯離子含量與深度之關係圖	- 110 -
圖 4-33 編號 45-S40-1 氯離子含量與深度之關係圖	- 111 -
圖 4-34 編號 45-S40-2 氯離子含量與深度之關係圖	- 111 -
圖 4-35 編號 50-O-1 氯離子含量與深度之關係圖	- 112 -
圖 4-36 編號 50-O-2 氯離子含量與深度之關係圖	- 112 -
圖 4-37 編號 57-O-1 氯離子含量與深度之關係圖	- 113 -
圖 4-38 編號 57-O-2 氯離子含量與深度之關係圖	- 113 -
圖 4-39 編號 57-S20-1 氯離子含量與深度之關係圖	- 114 -
圖 4-40 編號 57-S20-2 氯離子含量與深度之關係圖	- 114 -
圖 4-41 編號 57-S40-1 氯離子含量與深度之關係圖	- 115 -
圖 4-42 編號 57-S40-2 氯離子含量與深度之關係圖	- 115 -
圖 4-43 加速試驗與現地試驗關係圖(DGH 組).....	- 116 -
圖 4-44 加速試驗與現地試驗關係圖(NEW 組).....	- 116 -

照片目錄

照片 3-1 公路局研究之鑽心試體.....	- 117 -
照片 3-2 中型單軸拌合機.....	- 117 -
照片 3-3 振動台	- 118 -
照片 3-4 搖篩機	- 118 -
照片 3-5 養護室	- 119 -
照片 3-6 鹽霧循環室	- 119 -
照片 3-7 試體切割機	- 120 -
照片 3-8 自動電位滴定儀.....	- 120 -
照片 3-9 混凝土鑽粉機	- 121 -
照片 3-10 平面砂輪機	- 121 -
照片 3-11 切割後混凝土試體	- 122 -
照片 3-13 置於鹽霧室試體	- 123 -
照片 3-14 粉末取樣及溶液	- 123 -
照片 3-15 試驗後之混凝土試體	- 124 -
照片 3-16 抽氣過濾儀器	- 124 -

第一章 緒論

1.1 研究動機與目的

由於台灣本島就氣候分類是屬亞熱帶海島型氣候，而且又處於四面環海的位置，造成沿海地區的鋼筋混凝土建築物相當容易遭受鹽害；原因是海風於空氣中會夾帶大量的氯離子，當附著至建築物表層之後其建築結構體即開始遭受氯離子的侵蝕滲入，當氯離子與鋼筋接觸後相當容易造成鋼筋的腐蝕，使鋼筋混凝土結構物劣化和服務年限的縮短；特別是台灣在夏天時的高溫悶熱，又時常有雷陣雨、梅雨、颱風更是不時的侵擾，在這種氣候乾濕頻繁交替的情況下，會讓氯離子滲入的行為更加快速。

氯離子在腐蝕鋼筋之前雖會經過混凝土保護層，避免太快的直接接觸，不過氯離子在混凝土內的傳輸行為極為複雜，包含環境的溫度、濕度、水灰比、卜作嵐參料、外界氯離子濃度、齡期、孔隙率等等皆會對其造成影響，而現今用以量測混凝土對氯離子滲透耐久性的實驗主要有兩種：其一為美國材料試驗學會（American Society for Testing and Materials，ASTM）提出的ASTM C1202或美國公路運輸協會（American Association of State Highway and Transportation Officials，AASHTO）提出的AASHTO T277之氯離子快速滲透試驗（rapid chloride ion permeability test，RCPT），其二為AASHTO T259貯鹽試驗（ponding test），不過由於這兩項試驗都是將鹽水直接與混凝土表面接觸，和實際建築物與含氯離子海風接觸的情況差異甚大，所以本實驗欲利用研究室的複合式鹽霧耐久性試驗設備，加速模擬混凝土在現實環境遭受氯離子侵蝕之深度及濃度，再利用自動電位滴定儀測定混

凝土內不同深度氯離子的含量。

而另一方面，混凝土中添加卜作嵐材料也行有數十年的時間，有許多研究證實使用爐石、飛灰取代部分水泥確實會帶對混凝土帶來許多好處，如增加經濟性、耐久性、生態性；現今許多重大工程，在較先進國家也已漸漸普遍使用高爐石粉於混凝土上，尤以日本為最，因爐石粉混凝土具有較一般混凝土優異的抗壓強度及抗海水、抗硫酸鹽侵蝕的能力。所以在此研究中就不同比例的爐石取代量探討其對混凝土抗氯離子行為會造成的影響。

1.2 研究方法與內容

本研究主要分成兩個部份，詳述如下：

1. 探討不同混凝土配比及爐石取代量抗氯離子滲入的能力：

使用 0.45、0.50、0.57 三組一般混凝土配比，探討在不同水灰比時氯離子的滲入行為；以及針對 0.45、0.57 兩組水灰比的混凝土，再以高細度爐石粉(細度為 $6000 \text{ cm}^2/\text{g}$)為卜作嵐材料取代 20%、40% 的水泥用量，並觀測比較氯離子滲入深度及濃度和純水泥時的差別。

2. 尋找室內加速試驗與現地試驗的關聯：

國內外近幾年來已有許多量測和模擬沿海地區氯離子對建築物造成影響的研究【1-3】，而交通部公路總局也已針對氯離子的滲入行為進行逾五年的現地試驗，並已有完整的報告和數據，其現地試驗的實驗項目如圖 1-1；本試驗會接著將其鑽心取出的試體放入鹽霧加速循環室，透過短期的加速試驗結果和現地曝放分析數

據做比較，嘗試找出對應的比例關係，以期在未來可使用加速試驗模擬試體長時間暴露於外在環境的結果，大幅縮短類似研究所需耗費的時間。



第二章 文獻回顧

2.1 混凝土的孔隙結構

2.1.1 孔隙結構

混凝土這種材料是由水泥漿體與骨材所組成，其中水泥漿體又是由固態水泥膠體(Cement Gels)及毛細孔隙(Capillary Pores)所組成，而孔隙之結構與它的分佈則是影響混凝土強度與耐久性相當重要的因素；一般水泥漿體中的孔隙可依尺寸大小分為 C-H-S 層間孔隙、毛細孔隙、氣泡等三類【4】：

(1) C-S-H 層間之孔隙 (Inter space in C-S-H)：

為 C-S-H 膠體生成時，在其結構間之間隙，此孔隙約為 0.5~2.5nm，因其太小不致影響到強度與滲透性，但對乾縮與潛變的行為有影響。

(2) 毛細孔隙 (Capillary voids)：

水泥與水會產生水化反應，而水化反應的產物會取代原有水與水泥的體積，但仍有未被水化反應的產物所填充之體積，此體積即稱為毛細孔隙。而水灰比及水化程度皆會影響毛細孔隙，導致滲透性的影響，如圖 2-1 【4】所示，在有良好的水化反應及較低水灰比之水泥砂漿中，毛細孔隙的範圍為 10~50nm，若在早齡期即水化反應未完全，或是水灰比較高之水泥砂漿，孔隙範圍為 3~5μm，對強度與滲透性會有影響。

(3) 氣泡 (Air voids)：

氣泡不同於形狀不規則的毛細孔隙，其多為球狀，通常為拌合過程中所混入的氣體所造成，大小範圍為 $50\sim2005\mu\text{m}$ ，對強度與滲透性會有不利的影響。

由於水化的過程中，水分所佔之體積隨著水化程度與卜作嵐反應而逐漸被 C-S-H 膠體所填充，但有時其水分所佔空間的某部份並不能完全被水化膠體所填充，因而形成膠體孔隙；可見混凝土孔隙之形成與水灰比及水化程度(養護齡期)的關係相當大。水灰比越高，則孔隙越大，混凝土水化程度越好(養護齡期越久)，則孔隙越小。

2.1.2 水泥的水化機理

水泥主要是矽酸鈣與鋁酸鹽混合物，由石灰(CaO)、矽土(SiO_2)、礬土(Al_2O_3)與氧化鐵(Fe_2O_3)等原料礦物，按比例於高溫旋轉窯中隨著溫度的變化而生成的晶體礦物。生成的複合物主要有下列四種：一、矽酸二鈣($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$)，二、矽酸三鈣($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$)，三、鋁酸三鈣($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$)，四、鋁酸四鈣($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$)。當水泥加水後會產生水化作用，其中鋁酸三鈣最先水化生成鋁酸三鈣水化物，如有氫氧化鈣 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 存在則生成鋁酸鈣鹽水化物為可溶性；而矽酸鈣物質含量最大，且水化後生成矽酸鈣水化物為不可溶性，故為主要強度來源。

在水泥熟料的晶體礦物中，水泥強度發展的主要來源為活性較高的 C_3S 及 C_2S ，其水化產物為鈣矽水化物(C-S-H 膠體)及少量的氫氧化鈣(CH)。C-S-H 膠體為一種聚矽組合物(Polysilicate)，在水泥水化產物中約佔有 $50\sim60\%$ 左右之體積，膠體間之黏結力係由分子鍵所

產生【5】，對水泥強度有相當大的貢獻，矽酸鹽類的水化反應如下表示：



C₃A 及 C₄AF 晶體礦物對水泥漿的基本強度並無重要之貢獻，但對水化熱及凝結時間則影響較大，其水化產物為鈣鈍石(Etringite)及 C-A-H 水化物。上述四種礦物熟料由於化學成份、細度、冷卻速率、環境等的不同，而分別產生不同的水化能力與強度發展，如圖 2-2 所示，而圖 2-3【6】則顯示抗壓強度與粗骨材的關係。表 2-1 為波特蘭水泥複合成份的含量，而表 2-2 為波特蘭水泥複合成份特性【6】，由兩表知 ASTM 定義波特蘭水泥分為五種型式，其差別在於各種成分含量之百分比不同，因而控制水泥性質的變化。

2.1.3 水灰比與水化時間對孔隙結構的影響

最基本的水泥質材料組成為波特蘭水泥漿體。水灰比則代表水與水泥的重量比例，通常寫作：W/C (water-cement ratio)；相關研究曾指出：當混凝土水灰比介於 0.35 到 0.4 之間時，水泥就可以被水完全水化，因此當水灰比大於 0.4 時，對水泥水化而言，其用水量已過多，會造成水泥顆粒間的距離加大，毛細孔隙會開始增加【7】。當水灰比大於 0.7 時，即使水泥完全水化，由於所產生的毛細孔隙過大，造成孔隙之間互相重疊，形成大到足夠氯離子傳輸的連通網路。Mehta【7】亦利用壓汞計量測不同水灰比的水泥漿體內部孔隙分佈

情形，發現在完全水化狀態下，低水灰比（水灰比小於 0.4）毛細孔隙的寬度為 10 到 50nm，依上述孔隙結構分類，仍屬於微型孔隙範圍；然而當水灰比高時，其寬度便會驟增為 3 到 10 μm ；以孔隙率來看，毛細孔隙於水灰比 0.4 時約佔漿體總體積的 11%，但在水灰比 0.7 時則會增加至 37%。Powers【8】亦曾以水滲透試驗不同水灰比的漿體，其中發現不管任何水灰比或水化程度的漿體，當其毛細孔隙率大於 20%以上時，水的滲透係數會突然的增加。

對水泥水化程度而言，Mindess 與 Young【6】亦由水灰比 0.51 水泥漿體水滲透試驗發現，當水泥漿體甫硬固時，其滲透係數為 10-5 m/s；當齡期到達 1 天時，滲透係數降為 10-8 m/s；齡期為 7 天時，滲透係數為 10-11 m/s；28 天則為 10-13 m/s，100 天則再降為 10-16m/s，最後 240 天則降為 10-18 m/s。其中並認為水滲透係數大於 10-13m/s，毛細孔隙屬於連通的情形，由此 Mindess 與 Young 並說明各種水灰比漿體達到毛細孔隙無法連通所需的養護齡期，其中水灰比 0.4 為 3 天；水灰比 0.5 則為 28 天；水灰比 0.6 為 6 個月；水灰比 0.7 則為 1 年；水灰比大於 0.7，則認為水滲透係數無法小於 10-13 m/s。

2.1.4 磨物摻料對孔隙結構的影響

所謂的磨物摻料可分為三類，分別為低再活性材料（materials of low reactivity）、水泥質材料（cementitious materials）、與卜作嵐材料（pozzolanic materials）等。典型低再活性材料為石粉（rock dust），與骨材一樣均無法與水泥水化生成物產生任何化學作用，因此大多替

代細骨材使用，或用其改變水泥基複合材料的工作性。因此對孔隙結構的影響較少。水泥質材料則如同水泥一樣，可與水產生水化反應，如爐石（slag）等。卜作嵐材料並不直接與水產生水化反應，主要利用水化生成物中的氫氧化鈣產生卜作嵐反應，典型的卜作嵐材料為飛灰（fly ash）與矽灰（silica fume）等。礦物摻料大多以替代水泥之角色加入水泥基複合材料中，因此傳統水灰比的定義也轉換為水膠比（water-binder ratio），即將水泥與礦物摻料均視為膠結材料。目前混凝土中常用的礦物摻料則有高爐爐石粉（blast-furnace slag）與飛灰【9】（fly ash）兩種，而其分別更詳盡的介紹和影響在本章後段會有更詳細的說明。



2.2 混凝土中的氯離子傳輸行為

2.2.1 氯離子的來源與存在型態

由於混凝土內部有許多微小孔隙，當結構物位於海域環境時，海風會使海水引起海霧，吹至混凝土表面時，原本溶解於水中之氯離子便會利用毛細現象進入混凝土內部。或混凝土與海水接觸或浸泡時，海水會藉著水壓力進入內部孔隙，使得氯離子擴散現象隨之發生。而一般均認為混凝土中氯離子的主要來源可分為三個途徑：

1. 組成材料本身含有氯離子，如含有氯離子的細骨材或拌合水。
2. 添加含有氯離子之化學藥劑，如早強劑。
3. 由外部滲透進入，如海域環境鹽類侵入或使用去冰鹽寒帶地區。

而氯離子存在於混凝土中的型態也有三種方式。分別為：化學鍵

結型(Chemically bonded)、物理吸附型(Physically absorbed)、游離型氯離子(Free chloride ion)。前兩者一般又稱為鍵結型氯離子(Bound chloride)。分述如下【10】：

1. 化學鍵結型(Chemically bonded)：化學鍵結型的氯離子，是拌合材料中所含的氯離子，與水泥中的C3A起化學反應，形成難溶穩定的氯化鋁酸三鈣化合物($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 或 $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaCl}_2 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$)，即為較安定弗里德爾鹽(Friedel's salt)，此種鹽類於混凝土中是以穩定化合物的方式存在。
2. 物理吸附型(Physically absorbed)：物理吸附型的氯離子，是由拌合材料中所含的氯離子，與水泥成分中的C3S，產生物理吸附的作用，進而附著於水化產物的表面，使之不易產生游離現象。
3. 游離型氯離子(Free chloride ion)：游離型氯離子的來源，除了拌合材料中所含有的氯離子，在經過上述兩種結合作用之後，尚未固結的氯離子之外，也包含外在環境污染滲入混凝土中的氯離子。這一型氯離子，可以自由游離於混凝土的孔隙溶液中。

上述三種不同型態氯離子中，許多學者普遍的認為僅有游離氯離子及物理吸附型氯離子為產生鋼筋腐蝕的主要因素。

2.2.2 氯離子的傳輸途徑

氯離子侵入混凝土的行為與孔隙結構之連通性有相當影響，X. Wu 【11】提出氯離子侵入混凝土內部孔隙的三種傳輸途徑，其分別為（1）水泥漿體相互連通之孔隙；（2）骨材相互連通之孔隙；（3）水泥漿體與骨材間界面過渡區。對於離子的傳輸途徑，漿體的緻密性

與孔隙體積會影響氯離子之擴散速率。若水化達到一定程度時，毛細孔隙體積會隨水灰比而改變，水灰比增加時，毛細孔隙體積也隨之增加，相對也影響骨材與漿體介面之鍵結強度與性質；若離子於骨材之滲透行為低於水泥漿體與骨材和漿體的界面時，會因水泥漿體內含有較多孔隙率，使得成為主要擴散途徑，導致混凝土對氯離子之抵抗降低與增加氯離子擴散係數。

氯離子於混凝土中傳輸，需以水為媒介，藉由水進入混凝土內部連通孔隙中。混凝土結構物與水接觸，混凝土表面的水首先會藉由混凝土毛細管與液面之間的壓力差吸收進入混凝土內部，再藉由內外部的濕度差，導致進入孔隙的水利用水氣蒸發擴散至混凝土內部，當混凝土內外濕度逐漸相同時，孔隙間的含水狀態亦趨近飽和。此時若混凝土處於含有氯離子環境中，氯離子便容易伴隨著水氣進入混凝土中，而後氯離子在孔隙水中藉由濃度差的擴散機制在連通孔隙網絡中移動直至接觸鋼筋表面造成腐蝕。因此離子於混凝土材料中實際的傳輸行為，依順序分別為：(1)離子以水為媒介被吸收進入混凝土；(2)漸轉為離子由於孔隙水蕊絲現象(wick action)隨著水氣的蒸發擴散；(3)當孔隙水飽和時，轉由利用離子於水中濃度上的差異進行傳輸。對混凝土材料本身來說，連通孔隙結構（孔隙率、孔徑、蜿蜒度）與孔隙內部相對濕度（或含水量）均影響離子傳輸速率的快慢，毛細孔壓力滲透性與其他兩者之關係也會隨著孔隙結構變化【12】。而由傳輸型態區分，順序(1)與(2)均屬於非穩態傳輸行為。而影響離子傳輸的機制，依 Johannesson 分類可分為五大類【13】：

1. 擴散機制：由於混凝土內部連通孔隙水所含的離子濃度較低，因此暴露環境中的離子可藉由重量濃度梯度的不同，造成離子由高濃度位置流向低濃度位置。

2. 外力對流機制：離子藉由外界的力量梯度導致移動。例如毛細管孔隙水的吸收現象。
3. 離子吸附與析出機制：孔隙管壁的電雙層作用（electrical double layers）或與漿體產生化學反應導致離子吸附於水化生成物表層（孔隙管壁）和析出於孔隙水中。
4. 內部電化學反應機制：因電化學的氧化還原反應所造成的移動，如鋼筋腐蝕。
5. 外加電場機制：藉由混凝土外部施加電場使得整個電解反應產生，造成離子流在陰陽極間游動。

近幾年 David Conciatori 【14】等學者甚至新開發一模型與氯離子光學纖維傳感器來觀測氯離子在混凝土內的傳輸行為。



2.2.3 氯離子擴散係數

氯離子進入混凝土之擴散過程有許多方法【15】，也有許多學者提出計算方式，如 Bentz 【16】或是 John 【17】等人，不過這邊我們可由 Fick's 定律來說明，Fick 利用質量傳輸的觀念引發 Fick's first 定律，當氯離子擴散進入混凝土達穩態時可用 Fick's first 定律【18】如下 Eq (2.1) 所示：

$$J = -D \frac{dC}{dx} \quad (2.1)$$

J：氯離子通量

D：氯離子有效擴散係數

C：氯離子濃度

X：物質擴散所達到的距離

當氯離子濃度與時間關係有變化時，可用 Fick's second 定律來解釋。此定律多泛應用於固體或靜止液體之擴散，不過也須作下列之假設【19】：

- (1)混凝土孔隙為均勻分佈，孔隙截面積相等。
- (2)氯離子在孔隙溶液中為一維擴散。
- (3)孔隙中毛細管水所含之氯離子可擴散並入侵混凝土內部。

假定單一方向的擴散趨動方式，利用一個半無限的積分，設定 m 是一個最初提供的全部的氯離子濃度且在擴散的過程中並沒有其它的離子濃度來提供擴散的趨動力，可導出下式：

$$m = \int_0^{\infty} c dx, t \geq 0 \quad (2.2)$$

假設如果氯離子的濃度對於混凝土的表層來說，對其所相對的氯離子濃度是一個趨近於無限大的量的話，代入下列條件；

$$c = 0 \text{ for } x = \infty \text{ and } t > 0$$

在表面符合下列的條件：

$$c = 0 \text{ for } x > 0 \text{ and } t = 0$$

$$c = \infty \text{ for } x = 0 \text{ and } t = 0$$

可求得下式：

$$c = \frac{m}{\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right) \quad (2.3)$$

m 為總體氯離子濃度， D 為氯離子擴散係數， x 為氯離子到達之距離， t 為氯離子侵入之時間。

或是可轉為此式：

$$C = C_0 \times \operatorname{erf}\left(1 - \frac{x}{\sqrt{4Dt}}\right) \quad (2.4)$$

圖2-4 為氯離子滲入試驗典型的深度-氯離子含量圖。圖中之曲線可利用式 (2.3) 之迴歸分析求得，將 m 和 D 為變數進行回歸分析，

即可求得氯離子擴散係數。

從式（2.4）中可知，當 C_0 越高就會造成氯離子越快速的滲入，而也和外在氯離子濃度及氣候的溫度濕度有密切相關，在英國、日本、委內瑞拉的試驗中皆有對此做探討【20-21】，見圖2-5。

2.2.4 擴散係數隨齡期之演化

對於擴散係數的研究，後來 Mangat 與 Gurusamy 【22-23】以長期野外暴露試驗，提出了混凝土氯離子擴散係數為時間之函數；一般混凝土，其公式為：

$$D(t) = (2.81 + 7e^{-0.005t}) \times 10^{-8} \quad (2.5)$$

$D(t)$ ：擴散係數 (cm^2/s)

t ：時間 (s)

但文獻指出【22-23】一個合理擴散係數與時間的關係需滿足以下三個事項：

1. 隨時間增加時，混凝土孔隙隨著水化反應趨小而變少，所以擴散係數則會遞減。
2. 因為水化速率會越來越慢，所以擴散係數減低率會變小。
3. 隨著時間不斷前進，可以預測水化將終止，所以擴散係數會趨向一個常數。

在自然環境下，許多學者大多使用上一節所提到 Fick's law 中的氯離子擴散係數來計算氯離子於混凝土中的滲透率。Thomas【24】在研究指出混凝土試樣於不同時間下浸泡，其所表現為不同時間的濃度，因此 Fick's law 會因氯離子擴散係數沒有考慮時間因素而造成有

誤差情形發生，使得無法以短時間的外加電場試驗與長期暴露試驗做為相對評估。由於長期暴露試驗下，可以發現擴散係數隨著時間一直在改變，其得到的氯離子擴散係數為隨著時間變化的變量如圖 2-6【25】，在 Pack 【26】的研究中指出氯離子擴散係數會隨著時間與其對數函數遞減。因此 Thomas 以超過六個月的浸泡齡期試樣配合了傳輸機理、溫度與時間因素等有關因素導出以下經驗公式【24】：

$$D_t = D_{age} \left(\frac{t_{age}}{t} \right)^a \quad (2.6)$$

D_t : 某齡期擴散係數

D_{age} : 試驗室所做出的在固定時間的氯離子擴散係數

t_{age} : 試驗室試驗齡期（如 28 天）

t : 試驗時間

a : 經驗係數 ($OPC=0.30$, 飛灰= 0.60 , 爐石= 0.45)

由此經驗公式可大略評估氯離子擴散係數的變化，且可評估長期混凝土結構物受氯離子之影響，在文獻【27】也提到，當水灰比提升時，經驗係數則會相對降低；當然還有其他更多因素會影響擴散係數的改變，如外界環境中的氯離子濃度【28】，以及混凝土的抗壓強度與氯離子擴散係數亦成良好的線性關係【29】，因為此二數值皆與水灰比呈現良好線性關係，由此也可說明兩者會有一定之線性關係。

2.3 鋼筋腐蝕的原理

2.3.1 鹽害成因之判斷：

鋼筋混凝土劣化過程如圖 2-7 大約可分為潛伏期、進展期、加速

期、劣化期等幾個階段，而鋼筋被腐蝕之後的有效斷面積和腐蝕生成物的量，決定了混凝土結構物的殘餘壽命。而鹽害各階段過程劣化的定義如表 2-3 所示，而表 2-4 則為混凝土鹽害階段性的檢測建議項目【1】。

當鋼筋混凝土結構內的氯離子含量偏高，會導致鋼筋鏽蝕加速、加劇。混凝土中氯離子來源可能是內含的或外來的兩類：因為使用有瑕疵的原料（如誤用海砂作為細骨材），便可能使混凝土中含有異常超量的氯離子，此屬材料內含之鹽害型態；外來鹽害則又可分為兩類，一為靠海或臨海之鋼筋混凝土構造物，因為受含鹽海風之吹拂或海水之直接潑濺，使得鹽分有機會逐漸滲入鋼筋混凝土構造物中；另一型態則是在寒帶地區常使用碎鹽鋪灑，避免路面或橋面結冰，鹽分也因此會隨水分滲入至混凝土構造物內部，造成鋼筋鏽蝕的現象，此一因灑鹽所導致的鹽害在嚴寒地區較常發生。

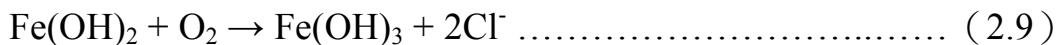
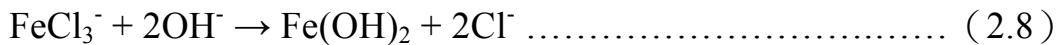
就外來鹽害而言，通常混凝土構造物表面多半已先形成裂縫【30】，致使鹽分滲入速率加快所致。很顯然地，外來鹽害的避免可藉由阻絕鹽分滲入途徑來達成，處理的方式可說較為單純。至於使用含有高氯離子含量的混凝土所導致鋼筋鏽蝕之鹽害，在處置上則相對地棘手許多，需視情況而決定是否作局部補修或者必須拆除，因此，當檢測結果顯示鋼筋混凝土構造物中鋼筋鏽蝕可能是因含鹽量過高所致時，在決定修補方法之前，必須要先判斷鹽害的來源。

2.3.2 氯鹽的侵蝕

氯鹽的侵蝕是造成鋼筋混凝土腐蝕最主要因素之一，氯離子來源有水泥、摻料、拌合水、骨材或環境中之氯離子。其對鋼筋之影響由

含水量與陰極反應所需之含氯量而定。

混凝土由於外界鹽分侵入或使用含鹽材料，當鋼筋表面氯離子含量超過臨界值時，則鋼筋表面的鈍化膜便會遭破壞而產生腐蝕。鋼筋遇混凝土孔隙中之氧氣、水份及氯離子所產生的腐蝕反應敘述如下：



由其反應機構可見氯離子有催化鋼筋腐蝕之作用。同時，腐蝕反應消耗 OH^- 而亦有使 pH 值降低的可能。此處之氯離子乃指游離態氯離子，另一種型態則為固定態氯離子。如前面所敘述，游離態氯離子存於混凝土毛細孔中，遇水會溶解；固定態的則被水泥中的 C3A 固定住而不溶於水。只有游離態氯離子具侵蝕性。當氯離子於混凝土生產時即加入，約 90 % 之氯離子被固定住，僅 10 % 之氯離子為游離態，然當混凝土中性化後，固定態之氯離子將被釋放成為具侵蝕性之游離形態；若氯離子為混凝土硬固後才由外界滲透，則一半氯離子會以游離態存在【1】。

對孔隙濕度而言，當混凝土內部孔隙完全乾燥時，外界中的氯離子無法侵入。若暴露環境的濕度較高或直接與水接觸時，水氣會由吸附與毛隙吸收現象進入混凝土孔隙中，並因蕊絲現象逐漸讓孔隙充滿水分。當連通孔隙呈現水飽和狀態後，外界氯離子會利用與孔隙水中氯離子濃度上的差異進行傳輸，此即擴散現象【31】。另一方面，由於水泥中氫氧化合物的因素，使得孔隙內部的水分呈現高鹼性狀態 ($\text{pH}>11$)，當鋼筋存在鹼性環境時，可以確保其表面鈍態保護膜的存在與受氯離子破壞後迅速再度形成的現象。但若受到大氣中二氧化碳的侵入，會使得孔隙水因為碳酸的形成導致 pH 值的降低。當氯離

子濃度與氫氧根濃度 ($[Cl^-]/[OH^-]$) 大於 0.3 時，便有極高的腐蝕機率【32】。

2.4 爐石混凝土之性質

2.4.1 卜作嵐材料

卜作嵐材料(Pozzolanic Materials)屬礦粉摻料的一種，為一種矽酸材料。由於水泥的水化反應會產生一水化物氫氧化鈣(CH)，約佔水泥產物總體積比之 20~25%，其作用僅作為填充孔隙用，對直接強度的貢獻不大，且易溶於水，故容易析出造成一般所謂的「白華」(Efflorescence)現象。這種高鹼易溶性之產物，由於易被水溶解而帶出，致使混凝土產生孔隙，進而降低混凝土之耐久性【4】，然卻是提供卜作嵐反應之重要水化結晶產物，它會與卜作嵐材料在濕氣下起化學反應而形成一種新的膠結材料，能填充孔隙、提高水密性及強度，稱之為卜作嵐反應(Pozzolanic Reaction)。

現今所使用的混凝土中常加入卜作嵐材料，利用卜作嵐材料的填加來取代部分水泥，而減少水泥用量降低成本，並增進耐久性及後期強度等；而卜作嵐材料的使用量，通常依材料之化學性質及水化反應速率的不同而有所不同，其水化反應速率可參考圖 2-8【33】，因此每一種卜作嵐材料皆可找到最佳的取代量。卜作嵐材料主要有矽灰、飛灰、爐石三種，其化學成分與物理性質如表 2-5【33】，以下即為這三種材料之特性【34】。

(1) 矽灰：

矽灰(Silicon Fume)為製造矽合金與鐵矽合金時的副產品；矽灰是一種玻璃球狀體，主要成分為二氧化矽，含量約 85%~98%，比重約 2.2，其粒徑非常小，平均粒徑大約 $0.1\text{~}0.2\mu\text{m}$ 之間，比表面積(細度) $20000\text{~}m^2/\text{kg}$ ，與水泥顆粒的 $250\text{~}m^2/\text{kg}$ 比起，細度約小 80~100 倍【35】，故可知矽灰具有良好的活性及填充性。由於矽灰顆粒小能有效填充，使混凝土孔隙減少更為緻密如圖 2-9 【36】、圖 2-10、2-11 【37】，而因為孔隙減少故可提高抗壓能力及耐久性。

(2) 飛灰：

飛灰【38】主要區分為 C 級與 F 級兩種，F 級飛灰含鈣量較低，膠結性較差；C 級含鈣較高，膠結性較好，飛灰的卜作嵐材料之反應較慢，混凝土強度的增加會比填加其它卜作嵐材料來得緩慢。飛灰的添加可以降低水化熱、抗硫酸鹽侵蝕、抑制鹼骨材反應與改善工作度。但是 F 級飛灰一般的氧化鈣低於 10%，只能產生卜作嵐反應，因而影響早期強度發展，當飛灰含量越高，混凝土早期強度越低。故以少比例的飛灰取代水泥會略為提升抗磨能力及耐久性，相反的過多的取代會有負面效果。

(3) 爐石：

爐石(Blast Furnace Slag)又稱爐渣，為煉鋼廠煉鋼的副產品，水淬爐石細度約 $400\text{~}600\text{~}m^2/\text{kg}$ ，有相當好的膠結能力，且能夠減少孔隙的產生【39】。爐石取代水泥越多時，混凝土早期強度發展較低，一般低於不含爐石的普通水泥混凝土。但齡期較長時，爐石的卜作嵐反應會使混凝土強度漸漸提高【40】。

2.4.2 爐石的成分性質

高爐爐石，簡稱高爐石，當煉鋼廠在以高爐煉鐵過程中，每生產一噸生鐵伴隨著產生約 300 公斤的高爐石【41】。爐石除高爐石外，尚有轉爐爐石及電弧爐石，這兩種爐石均不能做為混凝土之摻料使用，而高爐石又依其冷卻方式之不同，分為氣冷爐石及水淬爐石，其分類如圖 2-12 所示【42】，其中僅水淬高爐石可用為混凝土之摻料。高爐石及高爐石粉之生產流程如圖 2-13 所示【41】。

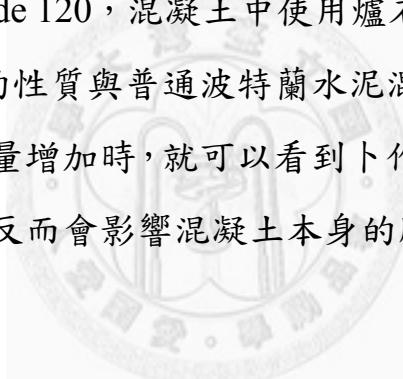
國內的中鋼公司早期僅生產氣冷爐石，一般都視為廢棄物，將其大部分做填海處理，少量則於當做混凝土骨材或用於路基。近年隨著中鋼產能提升，氣冷高爐石之產量每年產量增加速率加快，處理上已有困難，加上環保意識及節約能源觀念的興起，故開始將原來生產之氣冷爐石，改用噴水急速冷卻，因冷卻速率甚劇，晶體不易形成而產生大量玻璃質，而形成活性大的粒狀水淬爐石。水淬爐石由於其成分中氧化物與卜特蘭水泥熟料相近【43】，具有潛在水硬性膠結能力，若將爐石研磨成粒徑較細之爐石粉與卜特蘭水泥混合使用會產生卜作嵐反應，可形成鈣、矽比較低之類似水泥熟料之低密度矽酸鈣（C-S-H）及鋁酸鈣（C-A-H）等水合物，故可作為混凝土之礦物摻料。

在國內，爐石粉之使用開始於 1983 年，但爐石粉的使用在國外已有數十年之歷史，例如日本使用高爐水泥已有 90 年，且應用於許多重要工程。因爐石混凝土具有優異的強度及抗海水、抗硫酸鹽侵蝕的能力，所以常被應用在水壩溢洪道、橋樑、隧道及防波堤等水工結構工程上【44】。

高爐熟料含有較高量之二氧化矽（ SiO_2 ）與氧化鈣（CaO）以及中量之氧化鋁（ Al_2O_3 ）和氧化鎂（MgO），其成分與水泥成分相近，如表

2-5、圖 2-14【33】所示，一般亦將稱之為水泥質膠結材料(Cementitious Materials)，然而若緩慢的冷卻則 SiO_2 、 CaO 及 MgO 等會行成活性不佳之晶體，而影響化學反應的進行，因此快速冷卻使之形成玻璃質乃是使微結構更加開放的要件之一【45】。故高爐熟料的化學及物理性質會隨著原料來源及生產過程不同而有所差異，包括外形、化學晶相及水化活性等。

高爐熟料研磨成粉就可用來取代部分水泥，一般將其細度研磨至 $400\sim600 \text{ m}^2/\text{kg}$ 之時，即具有相當之膠結效力，且研磨越細與水接觸面積越大，反應活性會愈好【46】。依照爐石的化學和物理特性，ASTM 以爐石活性指數 (slag activity index) 將爐石分為三級，分別為 Grade 80、Grade 100 及 Grade 120，混凝土中使用爐石粉來取代水泥，當取代量少時，該混凝土的性質與普通波特蘭水泥混凝土之性質大致相同，但當爐石粉取代水泥量增加時，就可以看到卜作嵐材料的一些應用特性；但若添加過量，反而會影響混凝土本身的膠結品質。



2.4.3 爐石的水化反應機理

由於爐石粉與水泥會產生卜作嵐反應，使混凝土原本水化反應機理改變，對混凝土性質有所產生影響。下面為卜特蘭水泥之水化反應及含爐石粉 (卜作嵐材料) 的水泥卜作嵐反應之反應式：

卜特蘭水泥之水化作用：



含卜作嵐材料之卜作嵐反應：



而爐石混凝土的水化反應機理，可歸納為以下三個主要機理

【42】：

(1) 水合作用及卜作嵐反應：

爐石粉由於含高量玻璃質，其成分與卜特蘭熟料相似，具潛在膠結能力(在適當熱量、濕度與鹼性環境下，始具膠結能力)；與水泥混合使用，又可與水泥水合生成之氫氧化鈣及鹼發生卜作嵐反應，借以消耗混凝土中之氫氧化鈣及鹼骨材反應，形成類似卜特蘭水泥之水合物 C-S-H 與 C-A-H 膠體，可以有效填塞孔隙，因此可用以適量替代卜特蘭水泥。

(2) 顆粒堆積效應：

由於通常爐石粉之顆粒較水泥顆粒細小，爐石粉亦可視需要加以處理提高細度。故將爐石粉適量用於混凝土中，可使其原有的顆粒堆積程度更加緻密化。爐石粉之顆粒可填充於水泥顆粒之間，使漿體微觀結構更加緻密，並增進混凝土之耐久性，更提升混凝土之長期品質。

(3) 漿體體積效應：

爐石粉之比重小於水泥，故爐石粉以相等重量替代部分水泥時，膠結料總重量不變，但漿體實質佔有之體積會增加，亦即漿體對骨材之體積比會因而提高，有助於混凝土之工作性。

2.4.4 爐石對混凝土性質的影響

(1) 工作性：【47】

由之前提到的反應機理中可知，因漿體效應的影響，混凝土的工作性會因漿體體積之增加而有所改善；另外由於爐石粉的表面吸附水的能力較水泥差【42】，若以相同的水量進行拌合，以爐石粉取代部

分水泥會使游離水增加，坍度會略為增加，故以爐石粉適量取代水泥下，工作性會有所改善。然而爐石粉會些微增加泌水發生的機率，這可能是由於爐石粉的添加會延長凝結時間以及爐石粉表面的結構所致，泌水現象會影響混凝土表面的耐久性，不過較細的爐石粉將會減少泌水現象的發生。

(2) 強度發展

Lim and Wee 的研究顯示【48】，越高細度的爐石粉對早期強度的提高越明顯，而到了 91 天，不同細度的爐石粉卻有著差不多的抗壓強度，但仍明顯比 OPC 的高，這顯示越細的爐石粉可以提升早期強度，然而過了二十八天後，強度的成長將不明顯，如圖 2-15【49】所示，爐石粉的細度越高，對抗壓強度的提升越有幫助。

對於二十八天抗壓強度的影響；文獻【42, 50】提到爐石粉對混凝土強度發展之影響與混凝土之水膠比、養護溫度有很大關係。水膠比愈低，爐石粉對混凝土規定強度之提升愈明顯；高溫養護有助於爐石混凝土強度之提升，特別是早期強度。爐石粉取代水泥率對混凝土強度亦有很大影響，如圖 2-16【49, 51】所示，以爐石粉取代水泥在早期強度成長緩慢，強度比未加爐石粉者低，7 天後有以爐石粉取代水泥者強度明顯提升，以 28 天以後強度來看，爐石粉取代水泥量最佳值，在 40%~65%之間，當爐石粉取代水泥 50%時有最佳的抗壓強度，而圖 2-17【52】則是指出爐石粉取代量及水膠比，對於二十八天抗壓強度的影響。

(3) 耐久性【53】

以爐石粉取代部分水泥，因漿體微觀結構較緻密，使混凝土之耐久性提高，例如抵抗硫酸鹽侵蝕及鋼筋鏽蝕之能力【54-55】。文獻【51】，以爐石粉替代 50% 之第 I 型水泥，混凝土抗硫酸鹽侵蝕之能力與使用

第 V 型水泥相當，以相同比例替代第 II 型水泥，則效果更佳，這是因為爐石粉的卜作嵐反應使 C-S-H 與 C-A-H 之膠體量增多，水密性提升之結果。另外爐石粉對混凝土水密性之提升可有效抑制氯離子之滲入和電流的通過【56】，甚至其抗滲透程度也比飛灰高出五倍以上【57】，用以減少鋼筋之鏽蝕。且爐石粉的填加可減少鹼矽骨材反應，這是由於爐石粉可與鹼性物質產生水化反應，而減少骨材中的酸性物質與鹼金屬反應發生膨脹的機會。因此，添加卜作嵐材料可克制並消耗鹼性物質，同時增加膠結反應，確保了長期耐久性及強度，以減少維修及增加建築物的生命週期【58】。

除此之外，爐石對混凝土耐久性負面的影響為中性化方面，原因在於爐石導致氫氧化鈣濃度降低，所以只要些許的二氧化碳可以使氫氧化鈣形成碳酸鈣。相關文獻指出爐石替代量在 50% 以下時，中性化程度與未替代之混凝土相較，並無明顯增加之情形；然而添加量大於 70% 以上時，在乾燥環境狀態下，中性化會比一般混凝土更嚴重【59】。

(4) 彈性模數

抗壓強度、粗骨材影響彈性模數較明顯，在一般養護情形下，混凝土中以爐石粉適量替代水泥時，對混凝土之彈性模數較無顯著的影響。

(5) 體積穩定性

雖爐石粉對混凝土乾縮潛變影響尚無定論【60】，但大多數資料顯示，在養護不足下乾縮潛變會明顯增加，而在適當養護情況下，爐石粉對混凝土乾縮潛變之影響則甚微。

(6) 水化熱與混凝土溫度

在混凝土固化初期因水化作用釋放水化熱，由於混凝土導熱性較

差，故易於混凝土中產生溫度差而產生應力，可能使混凝土產生裂縫，為減少混凝土因水化熱過高所產生的溫度裂縫問題，爐石粉適量替代水泥，由於凝結的時間較長，可降低初期水化熱及混凝土內部溫度上升之速率，爐石粉取代水泥量率愈高或爐石粉活性愈差時，其降低水化熱之程度愈明顯。故爐石混凝土常被巨積混凝土形式的結構物所採用。

(7) 水密性

由於顆粒較小，以爐石粉取代水泥之混凝土漿有較緻密的漿體結構與較低之孔隙率，對混凝土的強度、耐久性均有正面的影響，而爐石粉之卜作嵐反應，使混凝土中水泥漿體內之毛細孔直徑減小，微觀結構緻密，因此非常顯著地增加混凝土之水密性，孔隙的細化可以減少較大孔隙的體積(大於直徑 $300\mu\text{m}$ 的)，因此可以減少氯離子滲透，增加對硫酸離子、海水、純水、冰凍的抵抗能力，而養護初期的環境對此影響十分重要【39】。

故爐石混凝土的特性有工作性略佳、凝結時間延長、早期強度發展較慢後期強度較高、水化熱較低、水密性高、透水性低，耐久性佳，抗硫酸鹽侵蝕等等。

2.5 氯離子耐久性相關試驗

2.5.1 氯離子含量的量測

檢查混凝土中氯離子含量的目的有二，一是用以研判氯離子含量

是否超過國家標準所規定的容許值。中華民國國家標準中以 CNS3090 的氯離子含量容許值廣為營建業參考及遵循。檢查混凝土中氯離子含量的另一目的是用以研判混凝土中氯離子的來源。氯離子的來源可能是來自混凝土所使用的粒料以及來自所在的環境(如海水)。

我們需要依據氯離子的可能來源進行研判，舉例來說如果氯離子是因為海水或海風所帶來的鹽分滲入混凝土所造成，試體取出後就不能把整個鑽出的圓柱試體一起磨成粉末進行氯離子含量分析。鑽出的圓柱試體必須要切成幾個，再各自進行分析以便了解在混凝土中距離表面不同深度的氯離子含量。有了氯離子在不同深度的資料，才能進一步研判鋼筋或套管及鋼腱腐蝕的可能性。

混凝土取樣的方法可以分成鑽心取樣或是鑽取粉末兩種方式。利用鑽心取樣方法的優點是氯離子含量較不會因為因為鑽取位置的選擇而有所變動，利用鑽取粉末方式的優點是比較容易進行，尤其是在「倒吊」的取樣位置。鑽取粉末方式的缺點在於同一取樣位置必須鑽取多次粉末，才能得到足夠具有代表性的數據，這是因為鑽頭尺寸較小如果沒有在同一取樣位置鑽取多次粉末，氯離子含量很容易偏低或偏高。

對於硬固混凝土的氯離子含量測試方法而言，可依根據國家標準 CNS 14702、CNS 14703 或美國 AASHTO T260 的分析方法，CNS 與 AASHTO 之分析方法均區分為採用酸溶法或水溶法將混凝土中的氯離子萃取出來，再用電位滴定法判斷氯離子含量，以酸溶法所測得之氯離子含量，較接近總氯離子含量(為固化型加游離型氯離子含量)，但仍無法完全萃取出硬固混凝土內之氯離子；而水溶法則測得較接近游離型氯離子含量，但如萃取時間超過 24 小時，則所測定之氯離子含量較趨於定值。然而，有一些簡易的氯離子檢測設備並不是採用滴

定法來判斷氯離子含量，很容易受到混凝土中性化測量及混凝土中硫化物的干擾。

2.5.2 鹽池試驗(Ponding Test)

1980 年以前鹽池試驗就已成為 AASHTO 的試驗規範 AASHTO T259。在 2002 年 ASTM 也列入正式規範，即 ASTM C1543。此規範在適用範圍上，說明此方法主要計算 NaCl 溶液由混凝土縱面進入內部的氯離子含量。但試驗最少天數為 90 天（AASHTO T259 規定為 90 天，因此亦稱為 90 days Ponding test），ASTM C1543 亦將 90 天認為是最初的取樣時間，建議必要時需進行 6 個月或 1 年浸泡的取樣間隔。由於試驗時間太長，將此試驗歸類為長期試驗與用來驗證其他加速試驗之準確性。

2.5.3 快速氯離子穿透試驗 (RCPT)

AASHTO T277 (ASTM C1202) 快速氯離子穿透試驗 (Rapid Chloride Permeability Test)，主要將飽和處理之試體嵌入兩個容量約為 250ml 的試驗槽之間，組合成一施加電壓單元。其中在一試驗槽中放入 0.3M 氯氧化鈉溶液作為陽極槽，另一試驗槽放入 3% 氯化鈉溶液做為陰極槽。並施加 60V 直流電壓來驅動離子，評估方式為將 6 小時試驗期間內所量測的電流值轉換成總電荷量，藉由總電荷量大小評估水泥基複合材料抗氯離子侵入能力。

此規範在適用範圍上即說明本試驗主要以混凝土導電性的決定做為評估混凝土抗氯離子入侵能力的快速指標。而表現混凝土導電性質的方式則利用外加的 60V 直流電壓使得氯離子快速進入混凝土材料中，藉由量測得到的電流值計算 6 小時內總通過電量 (total charge passed)，用以評估混凝土抵抗氯離子滲透的能力。由於這個方法具有耗時較短與量測方式精簡等優點，因此目前廣泛應用於評估混凝土耐久性試驗中，但很多研究文獻【61-62】中指出 RCPT 尚有許多缺失，尤其是添加礦物摻料時常低估混凝土抵抗氯離子滲透的能力。

2.5.4 加速氯離子傳輸試驗（ACMT）

由海洋大學材料所研發的本土化氯離子傳輸試驗法—ACMT【63】(accelerated chloride migration test)。試驗槽溶液與 RCPT 均採用相同濃度的溶液。而 ACMT 與 RCPT 兩者最大不同之處為試驗槽的體積與電壓。ACMT 試驗槽的容積約為 4500 ml，遠大於 RCPT 試驗槽的容積 (250 ml)，試驗槽容積的增加可避免試驗期間溫度所引起的焦耳熱效應而放熱，並可在試驗期間提供足夠試樣以量測試驗槽內氯離子濃度的變化。除可探討氯離子傳輸歷程外，亦可計算水泥基複合材料的氯離子擴散係數【64】，藉此作為評估氯離子穿透能力的指標。

2.6 鹽霧試驗

2.6.1 鹽霧試驗的介紹

鹽霧試驗是一種主要利用鹽霧試驗設備所創造的人工模擬鹽霧環境條件來考核產品或金屬材料耐腐蝕性能的環境試驗。人工模擬鹽霧環境試驗是利用一種具有一定容積空間的試驗設備——鹽霧試驗箱（室），在其容積空間內用人工的方法，造成鹽霧環境來對產品的耐鹽霧腐蝕性能質量進行考核【29】，或是進行海水噴掃試體方式進行【65】。它與天然環境相比，其鹽霧環境的氯化物的鹽濃度，可以是一般天然環境鹽霧含量的幾倍或幾十倍，使腐蝕速度大大提高，對產品進行鹽霧試驗，得出結果的時間也大大縮短。國內如 CNS8886、CNS12874、CNS3627 和國外的 ASTM 也都有相關試驗規範。

Maruya 【66-67】等人提出採用乾濕循環的方式，來加速氯離子的擴散。因為研究發現當乾濕交替之際，在混凝土表層和接近混凝土表層處的總氯離子含量會突然的增加，而其勢必會朝向濃度較低處擴散，所以擴散的速率將會提升，如圖 2-18 就顯示加速擴散之情況。而模擬鹽霧試驗也有包含中性鹽霧試驗、醋酸鹽霧試驗、銅鹽加速醋酸鹽霧試驗、交變鹽霧試驗。

- (1) 中性鹽霧試驗 (NSS 試驗 ASTM B117) 是出現最早目前應用領域最廣的一種加速腐蝕試驗方法。它采用 5% 的氯化鈉鹽水溶液，溶液 PH 值調在中性範圍 (6~7) 作為噴霧用的溶液。試驗溫度均取 35°C ，要求鹽霧的沉降率在 1~2ml/80cm².h 之間。
- (2) 醋酸鹽霧試驗 (ASS 試驗) 是在中性鹽霧試驗的基礎上發展起來的。它是在 5% 氯化鈉溶液中加入一些冰醋酸，使溶液的 PH 值

降為 3 左右，溶液變成酸性，最後形成的鹽霧也由中性鹽霧變成酸性。它的腐蝕速度要比 NSS 試驗快 3 倍左右。

- (3) 銅鹽加速醋酸鹽霧試驗（CASS 試驗 ASTM B368）是國外新近發展起來的一種快速鹽霧腐蝕試驗，試驗溫度為 50°C，鹽溶液中加入少量銅鹽—氯化銅，強烈誘發腐蝕。它的腐蝕速度大約是 NSS 試驗的 8 倍。
- (4) 交變鹽霧試驗是一種綜合鹽霧試驗，它實際上是中性鹽霧試驗加恒定濕熱試驗。它主要用于空腔型的整機產品，通過潮態環境的滲透，使鹽霧腐蝕不但在產品表面產生，也在產品內部產生。它是將產品在鹽霧和濕熱兩種環境條件下交替轉換，最後考核整機產品的電性能和機械性能有無變化。

2.6.2 電位滴定法

電位滴定法是在滴定過程中通過測量電位變化以確定滴定終點的方法，和直接電位法相比，電位滴定法不需要準確的測量電極電位值，因此，溫度、液體接界電位的影響並不重要，其準確度優於直接電位法，普通滴定法是依靠指示劑顏色變化來指示滴定終點，如果待測溶液有顏色或渾濁時，終點的指示就比較困難，或者根本找不到合適的指示劑。電位滴定法是靠電極電位的突躍來指示滴定終點，如圖 2-19。在滴定到達終點前後，滴液中的待測離子濃度往往連續變化 n 個數量級，引起電位的突躍，被測成分的含量仍然通過消耗滴定劑的量來計算。

使用不同的指示電極，電位滴定法可以進行酸鹼滴定，氧化還原滴定，配合滴定和沉澱滴定。酸鹼滴定時使用 PH 玻璃電極為指示電

極，在氧化還原滴定中，可以從鉑電極作指示電極。在配合滴定中，若用 EDTA 作滴定劑，可以用汞電極作指示電極，在沉澱滴定中，若用硝酸銀滴定鹵素離子，可以用銀電極作指示電極。在滴定過程中，隨著滴定劑的不斷加入，電極電位 E 不斷發生變化，電極電位發生突躍時，說明滴定到達終點。

如果使用自動電位滴定儀，在滴定過程中可以自動繪出滴定曲線，自動找出滴定終點，自動給出體積，滴定快捷方便。電位滴定的基本儀器裝置包括滴定管、滴定池、指示電極、參比電極、攪拌器，測電動勢的儀器。

進行電位滴定時，被測溶液中插入一個參比電極，一個指示電極組成工作電池。隨著滴定劑的加入，由於發生化學反應，被測離子濃度不斷變化，指示電極的電位也相應地變化。在等當點附近發生電位的突躍。因此測量工作電池電動勢的變化，可確定滴定終點。電位滴定曲線即是隨著滴定的進行，電極電位值（電池電動勢） E 對標準溶液的加入體積 V 作圖的圖形。根據作圖的方法不同，電位滴定曲線有三種類型， $E-V$ 曲線，普通電位滴定曲線，拐點 e 即為等當點。

電位滴定法比起用指示劑的容量分析法有許多優越的地方，首先可用於有色或混濁的溶液的滴定，使用指示劑是不行的；在沒有或缺乏指示劑的情況下，用此法解決；還可用於濃度較稀的試液或滴定反應進行不夠完全的情況；靈敏度和準確度高，並可實現自動化和連續測定。因此用途十分廣泛。

2.6.3 混凝土在鹽霧試驗下的行為

將混凝土放入鹽霧試驗室做循環試驗，是為了模擬實際曝放於

現地的氯離子滲入行為，由於結構物在不同地點會面對到不同的環境影響因子，而蒐集這些資訊也相當大量且繁複耗時如圖 2-20【2】，所以國內外近年開始透過加速實驗探討混凝土在不同參數變化下的氯離子滲入行為和滲透係數【68-69】，以推估結構物合理的服務年限；根據文獻【70】研究表明水灰比對氯離子滲透深度有較大的影響，也證明試驗數據所測得的滲透係數和公式有很高的相關性；而在固定的試驗時間下，混凝土中的氯離子濃度會隨著離表面距離增大而減小，如圖 2-4 所示，在特定深度之下時間較短的循環也能使當點的氯離子濃度高於較長的循環【25】。而環境變數的設定也對氯離子滲透量有明顯的影響，當乾燥溫度條件較高，造成較強烈的風乾現象，毛細管吸收作用就越大，使表層孔隙溶液鹽分濃度增高，縱而促使了內部擴散作用，也就會造成更深的氯離子分佈【71】。而 Hans【72】對暴露於去冰鹽水中的交通廊道後牆的氯離子分佈調查中，也發現在乾濕循環下會加速氯離子對混凝土的侵入，並且在表層一定深度處氯離子濃度會產生一個峰值。

第三章 實驗計畫

3.1 實驗內容

由文獻回顧可知，氯離子在混凝土內的傳輸行為是一個相當複雜的過程，在實務上怎樣的配比能使氯離子滲入混凝土內的時間拉長和濃度減少，就是我想透過研究了解的，本實驗即是利用不同水灰比的差異，以及透過使用不同比例的高細度爐石粉取代部份水泥，以增加其緻密性，藉此來觀測氯離子滲入量的差異。

另外一部分會直接將交通部公路總局「台灣苗栗以北地區大氣中氯鹽與橋樑腐蝕劣化環境之研究」的試體直接放入鹽霧室中，在一固定時間間隔下分別取出受加速試驗侵蝕的試體，分析其氯離子的滲入深度及濃度，並尋找其與現地試驗結果的關聯性。



3.2 混凝土配比與實驗設計

3.2.1 組成材料

本試驗材料包括水、水泥、粗骨材、細骨材、爐石等材料，其內容分述如下：

(1) 水泥：

本實驗採用台灣水泥公司品牌第 I 型波特蘭水泥，其化學成分列於表 3-1，其物理性質列於表 3-2。

(2) 爐石粉：

本實驗採用中聯爐石公司所產之高爐石粉，其物理、化學性質列於表 3-3。

(3) 粗骨材：

本實驗所採用之粗骨材為大陸福建天然石之碎石，其物理性質與篩分析詳列於圖 3-1 與表 3-4 所示。

(4) 細骨材：

本實驗所採用之細骨材為大陸閩江天然之河砂，其物理性質與篩分析列於表 3-5。

3.2.2 配比設計

本試驗的配比設計，是為了與交通部公路總局委託台灣營建研究院所進行「台灣苗栗以北地區大氣中氯鹽與橋樑腐蝕劣化環境之研究」結果做對照為主要目標，所以取研究原編號 245 及 350 的兩組配比(水灰比 0.57 及 0.45)，試驗配比表見表 3-6，試體編碼表見表 3-7。也由於鹽霧室為本研究室新購入的設備，還相當缺少相關試驗資料，所以增加一組水灰比 0.50 的配比，為了與海洋大學楊仲家老師所進行「混凝土耐久性試驗研究—氯離子滲入深度(速率)之探討」【29】的研究結果做比較。

3.2.3 實驗變數

(一) 實驗室新拌試體

為探討不同配比和爐石取代量對氯離子滲入深度及濃度的影響，本實驗之混凝土於澆置後先進行養護 28 天，接著放入鹽霧試驗機，採用四小時鹽霧試驗、兩小時乾燥試驗、四小時濕潤試驗、兩小時乾燥試驗的循環，其餘變數如下：

1. 混凝土配比

以水膠比 0.45 和 0.57 兩組配比為主，比較高低水膠比的差異，另增加一組水灰比 0.50 的普通混凝土做為對照。

2. 爐石取代量

採用 S6000 型爐石，取代水泥量分別為 0%、20%、40%。

3. 鹽霧試驗時間

當養護 28 天後將試體放入鹽試務驗機做反覆循環試驗，分別在 672 小時（四週）和 1344 小時（八週）時將試體取出量測其氯離子滲入深度及濃度。

（二）長期曝放試體

本實驗取公路局研究之鑽心試體見照片 3-1，試體配比列於表 3-8；首先去除表面遭氯鹽侵入部分（約 5 公分），後將其至於鹽霧試驗室，分別於 672 小時（四週）和 1344 小時（八週）後將其取出，同樣量測氯離子滲入之深度和濃度，試體編號則為與原先研究相同，故取名為 245、350、SCC、II，其試驗結果會和現地試驗數據作比較討論，試體的編碼見表 3-9。

3.3 實驗儀器與設備

（1）中型單軸拌合機：

HOQURT 生產，成都食品機械行代理，型號：HK-101，110V，60Hz，3 段變速，拌合上限為 7kg，見照片 3-2。

（2）振動台：

灌製砂漿試體時，以震動方式將體內氣泡排出，並且確保試體能確實充填於模內，見照片 3-3。

(3) 搖篩機：

材料做初步性質試驗用，做為判別粗細粒料以及大小顆粒之間分佈狀況之用，見照片 3-4。

(4) 養護室：

養護室為複合式鹽霧耐久性試驗設備的 B 室，環境是 ASTM 標準濕室（ 25°C ，100%RH）見照片 3-5。

(5) 鹽霧循環室：

為複合式鹽霧耐久性試驗設備的 C 室，內部材質為 SUS#316 耐熱耐寒不鏽鋼板，外部採鋼板烤漆，可進行噴霧→乾燥→潤濕的循環試驗，見照片 3-6，由外部控制器操控環境參數。

(6) 試體切割機：

混凝土試體切割機，試體最大寬度 15cm，採用濕式鑽石切割鋸片，刀片厚度約 2mm 見照片 3-7。

(7) 自動電位滴定儀：

採用瑞士萬通 Metrohm 809 型自動電位滴定儀，配合軟體 tiamo 1.2.1 可進行自動滴定，並透過 CNS14703 氯離子含量試驗法可量測混凝土中氯離子濃度，見照片 3-8。

(8) 混凝土鑽粉機 (Profile Grinder)：

由 GERMANN INSTRUMENTS (<http://www.germann.org/>) 所生產，型號 PF-1100，可將混凝土磨成粉末狀，精密的取得特定深度的混凝土粉末(深度間距可達 0.5 mm)，進一步準確的測得各深度之氯離子含量，見照片 3-9。

(9) 平面砂輪機 (Angle Grinder)：

日立 HITACHI PDA-100K 強力型 4 英吋平面砂輪機，用於將混凝土試體研磨拋光，見照片 3-10。

3.4 試驗內容與方法

3.4.1 混凝土拌合試驗過程

本實驗以中型拌合機進行混凝土砂漿之拌合工作，依照下列步驟進行拌合：

- (1) 拌合前先以 130°C 的溫度烘烤粗、細骨材約 24 小時，以便量測粗、細骨材的含水率。
- (2) 先置入標準砂，後加入水泥及爐石粉，以低速乾拌至均勻。
- (3) 加入部分水使砂漿似泥團塊狀，刮落拌合槽之附著料後繼續拌合至均勻。
- (4) 再加入未用水，重複上述過程，先低速拌合，刮落附著料後繼續拌合，最後再拌合 1~2 分鐘後出料。
- (5) 出料後加入粗骨材，用手將其拌合均勻，再將混凝土分三層澆置於鋼模或紙模內，澆製完畢後均以振動台振動，減少氣泡孔洞留置在混凝土內部，後將表面鏝平放置於陰涼處。
- (6) 於二十四小時混凝土硬固後拆模，隨即放入標準養護室內進行養護(25°C ， $100\%\text{RH}$)，待 28 天試驗齡期到達時，再將試體取出進行試驗。

3.4.2 鹽霧試驗試驗過程

本研究鹽霧複合耐候試驗主要將養護後之試體放入鹽霧複合試驗室內於設定之氣候條件下進行。試體放入前先以試體切割機將其切成所需寬度，見照片 3-11，再以平面砂輪機將其表面磨平，接著除讓鹽水噴霧的一面外，其餘試體周圍各面均需以水晶膠塗封，見照片

3-12。再將試體置於鹽霧室內，見照片3-13。由於相關規範對混凝土鹽霧複合耐候試驗的環境條件規定並不明確，因此在進行試驗前參考適用於金屬材料的ASTM B117、ASTM G85、與ASTM B368等相關鹽霧試驗來設定預模擬的氣候劣化條件。

研究為考量試驗結果需以Fick 第二定律計算氯離子擴散係數，因此需使用一定數量的試驗結果進行迴歸分析。故進行鹽霧複合耐候試驗的暴露劣化條件則擬以12 小時為循環週期，其中4 小時為鹽霧試驗，其後2 小時為烘乾狀態，再來進行4 小時鹽水浸滯試驗，最後則為2 小時的烘乾狀態，其示意如圖3-2所示。主要考量此狀態對混凝土劣化情形較為明顯，且有利於不同深度混凝土氯離子濃度的量測。在劣化時間設定上，則分別為672 小時（四星期）、1344 小時（八星期）。

混凝土經上述暴露條件劣化後，依AASHTO T260試驗方法，量測由暴露面起混凝土各深度的平均氯離子含量相對混凝土重量比值，並以氯離子含量百分比作為表示，將其繪製成深度與氯離子濃度之關係曲線。

3.4.3 分層全斷面磨粉試驗過程

(一) 混凝土取樣

- (A) 將混凝土從鹽霧室取出後，使用混凝土鑽粉機（Profile Grinder）取其粉末，每隔 2mm 取樣一組以做測試，見照片 3-14、3-15。
- (B) 磨取之粉末使其通過 50 號篩。
- (C) 參照 AASHTO T260 之酸溶法，進行氯離子含量分析

(二) 氯離子取樣

- (A) 利用精密天平將烘乾 (105°C) 粉末秤重約 3 g 進行試驗。
- (B) 將約 3 g 粉末置入燒杯並加入 10 mL 去離子水，加入磁石並放置於加熱攪拌台上進行攪拌，使粉末均勻分散於液體中。
- (C) 加入 3 mL 濃硝酸持續攪拌，並加入 50 mL 沸騰水稀釋並且持續攪拌。如果試樣含有爐石或具有硫化物之材料必須加 3 mL 的 30% 過氧化氫溶液。
- (D) 並加入 5 滴甲基澄指示劑，如果溶液酸性不夠時加入少量濃硝酸並持續攪拌直到指示劑呈現粉紅或紅色為止。
- (E) 於燒杯上蓋上錶玻璃並置於加熱平台上加熱 ($250\sim400^{\circ}\text{C}$) 至沸騰並持續一分鐘後即可移開加熱平台。
- (F) 利用抽氣過濾設備，以及 Whatman 濾紙 (#41 在上、#40 在下) 兩張進行雜質過濾，見照片 3-16。
- (G) 過濾完畢後利用沸騰去離子水沖洗濾紙，將殘留於濾紙上的氯離子洗入燒杯容器內，並避免氯離子殘留於濾紙上。
- (H) 最後溶液體積保持約為 125~150 mL 間，並蓋上錶玻璃放置室溫且無鹽酸煙霧污染的大氣中冷卻。

3.4.4 電位滴定試驗過程

氯離子濃度量測法依據 AASHTO T260-94，使用電位滴定法以 0.01 N 標準硝酸銀溶液滴定每個濃度數據均為三次滴定試驗結果之平均值。電位滴定法主要是利用 0.01 N 標準硝酸銀溶液滴定含有氯離子之溶液使其產生白色氯化銀沉澱，滴定進行時，首先需利用硝酸將取樣之溶液酸化，本研究中所使用的電位滴定儀為 Metrohm 809 型

(如圖5-5)，此儀器之量測精度可達10 ppm，且可由電腦連線記錄其試驗資料。藉由電極棒量測滴定過程中氯離子的氧化電位，當電位突然有明顯的變化時，產生滴定終點 (Equivalence Point; EP)。

由於硝酸銀溶液極易受光線干擾，因此試驗前需以標準0.1 N 標準氯化鈉溶液標定，使用0.1 mL 標準氯化鈉溶液進行AgNO₃ 溶液標定，使用滴定終點之硝酸銀溶液滴定量，以下式求得硝酸銀溶液之體積莫爾濃度：

$$N_{\text{AgNO}_3} = \frac{0.1 \times 0.1}{V_{\text{AgNO}_3}}$$

N_{AgNO_3} : 硝酸銀溶液體積莫爾濃度(mole/L)。

V_{AgNO_3} : 滴定終點硝酸銀溶液滴定量 (ml)。

氯離子含量檢測時將酸溶法或水溶法所取得之試體溶液，置於滴定儀測得滴定終點，藉由滴定終點所得之硝酸銀溶液滴定量與已知的標準當量濃度，可以計算滴定溶液中氯離子含量，計算式如下：

$$[\text{Cl}] = \frac{3.545 N_{\text{AgNO}_3} V_{\text{AgNO}_3}}{W}$$

$[\text{Cl}]$: 試體中氯離子含量(%)

W : 試体重(g)

由氯離子濃度換算為氯離子重量，再將此重量除以試樣重 3 克，及混凝土中氯離子所佔的重量百分比。

第四章 試驗結果與討論

4.1 前言

研究分為兩個部分來做討論，第一個部分是針對新拌混凝土的氯離子滲透擴散現象作討論，就不同水灰比、爐石取代量、以及一個月和兩個月的試驗齡期分別探討其氯離子擴散行為，以及使用回歸分析得到之氯離子擴散係數來比較；第二部分是將新拌試體水灰比 0.45 和 0.57 兩組普通混凝土的結果，與公路局現地試驗數據和鑽心試體的加速試驗做共同的比較，建立起連結的相互關係。

由於氯離子滲入時，其穿透粗骨材的能力相對於其餘砂漿部分是相當微量的，所以混凝土中的氯離子含量會受到取樣範圍內粗骨材所佔體積的影響，其分佈的均勻程度也無法用肉眼辨識做詳盡的評估，若一個試體取樣範圍中粗骨材含量較多時，則氯離子含量則會較少，故為了避免此因素造成的誤差，需透過各個深度與氯離子濃度的曲線關係進行迴歸分析，求取氯離子擴散係數，作為進一步討論和判別之用。

4.2 實驗乾濕循環條件

參考文獻【29】所設定的乾濕循環設定，我們採用與其相同的循環設定：四個小時的鹽霧噴灑、兩個小時的高溫乾燥、四個小時個霧氣濕潤、再次兩個小時的高溫乾燥，並且重複這樣的循環設定，一個週期共十二個小時，用原本設定的試驗時間換算：一個月的劣化試驗就等於 56 個循環，兩個月的劣化試驗就是進行了 112 次循環；採用這種設定是考量此狀態對混凝土的劣化情形較為明顯，因為研究發現

當乾濕交替之際，在混凝土表層和接近混凝土表層處的總氯離子含量會突然的增加，而其勢必會朝向濃度較低處擴散，所以擴散的速率將會提升，且有利於不同深度混凝土氯離子濃度量測，在大量噴灑鹽霧於混凝土式體表面之後，高溫會讓表面的水被蒸散，孔隙之間的通路也會打通，預備進行下一循環的鹽霧噴灑和擴散行為。

從圖 4-1、4-2 及表 4-1、4-3 試體不同深度的氯離子含量可知：在與鹽霧接觸的試體表面有相當高的氯離子含量，當隨著深度的增加，其氯離子含量也呈類似線性的程度遞減，與 Fick 第二擴散定律的模型是符合的。以下分別針對水灰比、爐石取代水泥量、試驗齡期不同變數與以討論。

4.2.1 水灰比之效應

從圖 4-3、4-4 可見水灰比與氯離子濃度的關係，在進行鹽霧試驗一個月後，45-O-1 的擴散深度大約至 1cm 的深度，50-O-1 能進入到 1.5cm 左右，而 57-O-1 則可以滲透到超過 1.5cm 的深度，當試驗兩個月之後每一個試體的氯離子擴散深度皆超過 1.5cm，當中 57-O-2 的試體更達到 2cm 左右的位置，可見水灰比直接導致毛細孔隙的多寡，影響了氯離子滲入的深度。而由表 4-5 中可發現當水灰比越高時，混凝土的氯離子擴散係數就越高，於一個月試驗 45-O-1 氯離子擴散係數最低，表 4-6 顯示若水灰比增加到 50-O-1 的時候擴散係數提升了 4.4%，當水灰比提高至 57-O-1 時，氯離子擴散係數則提升了 54.7%，兩個月試驗後的結果是水灰比由 45-O-2 增加到 50-O-2 的時候擴散係數提升了 9.8%，當水灰比由 45-O-2 提高至 57-O-2 時，氯離子擴散係數則提升了 66.4%；雖然其關係並非成線性增加，但也就表示

若使用較多的水來拌合，會產生較多的細小孔隙通路，讓氯離子更容易滲入深處。而 Powers 【8】曾提到以水的滲透試驗不同水灰比的漿體，發現不管任何水灰比或水化程度的漿體，當其毛細孔隙率大於 20%以上時，水的滲透係數會突然的增加，而孔隙率 20%的分界處大約就在水灰比 0.50~0.60 之間，更精確的數字則需再利用壓汞計量測，但根據氯離子擴散係數大幅度的跳躍可估計是由於毛細孔隙率突然增高所致。

4.2.2 爐石取代之效應

本試驗的研究重點之一，便是在爐石粉取代所帶來的效應，而爐石取代最主要的影響變因有兩個：其一為爐石細度，另一部份為爐石取代水泥比例；而我們選用表面積較高 $6000\text{ cm}^2/\text{g}$ 的高細度高爐石粉，針對水灰比 0.45 與 0.57 兩組配比，增加爐石粉替代水泥 20%，以及替代 40% 兩組對照的配比設計，而在經過一個月和兩個月的鹽霧試驗之後，我們可以從圖 4-5 至 4-8 發現：除了水灰比 0.45 試驗一個月這組試體，其餘試體皆呈現相同的結果，在沒有添加爐石的混凝土中，氯離子能擴散的深度屬當中同組中最深入的，再來是有 20% 爐石替換水泥的試體，而取代 40% 的試體則擴散深度則是最淺的，並且到兩個月後其氯離子擴散深度的差距也有拉大的趨勢，文獻【50】表示在高溫養護的環境下其實是有助於爐石混凝土強度之提升，也代表爐石混凝土其孔隙率也下降得較同水膠比卻沒有含爐石的試體來的更加迅速。

接著再從氯離子擴散係數的觀點來討論，從表 4-5 的結果可發現：當爐石取代水泥比例越高時，氯離子擴散係數就會越低，由於爐石的

比表面積較大，也代表其顆粒較微小，使水化反應更加的迅速和劇烈，在填充細微孔隙以及提升緻密性上皆有許多貢獻，另外文獻【56】也直接說明爐石粉對混凝土水密性之提升可有效抑制氯離子之滲入，爐石粉之卜作嵐反應，使混凝土中水泥漿體內之毛細孔直徑減小，微觀結構緻密，因此非常顯著地增加混凝土之水密性，孔隙的細化可以減少較大孔隙的體積(大於直徑 $300\mu\text{m}$ 的)，甚至其抗滲透程度也會提升許多，而且在早期高水膠比的情況下，會有較佳的爐石取代效果。如表 4-6 所示當劣化一個月後 45-S40-1 的試體與 45-O-1 相比，氯離子擴散係數降低了 49.8%，但當水膠比提升之後 57-S40-1 與 57-O-1 的相比，氯離子擴散係數則降低達 67.2%；若試體進行劣化兩個月後(澆製後 84 天)，水膠比 0.45 試體有添加爐石的影響程度 (45-S20-2 與 45-O-2 相比降低 47.1%，45-S40-2 與 45-O-2 相比降低 75.3%) 就超越了高水膠比 0.57 所呈現的結果 (57-S20-2 與 57-O-2 相比降低 38.4%，57-S40-2 與 57-O-2 相比降低 74.4%)；不過從圖 4-9 至 4-12 可明顯看出當爐石取代水泥的量在 0%~40% 之間時，會造成氯離子擴散係數呈現遞減的趨勢 ($R^2=0.98\sim0.99$)，不過也並非爐石取代越多會有越好的效果。

另一方面由於通常爐石粉之顆粒較水泥顆粒細小，故將爐石粉適量用於混凝土中，可使其原有的顆粒堆積程度更加緻密化。爐石粉之顆粒可填充於水泥顆粒之間，使漿體微觀結構更加緻密，並增進混凝土之耐久性，更提升混凝土之長期品質。而我們當初在計算爐石取代量的配比時是採用重量取代法，由於爐石的密度每立方公分 2.92 克，水泥則為 3.15 克，計算結果膠結料總重量不變，但漿體實質佔有之體積會增加，亦即漿體對骨材之體積比會因而提高，同時也有助於混凝土之工作性，再加上文獻【69】提到有添加爐石的混凝土會使氯離

子的吸附能力增加，由第一個月的試驗結果看出初始濃度和內部濃度會有明顯提高的現象，但由於氯離子擴散係數較低，所以其濃度降低的速率也相對較快速，這也可解釋為何 0.45 一個月的試驗結果和其餘相異之原因，故爐石粉取代量的多寡會明顯的影響氯離子滲入的濃度和距離。

4.2.3 試驗齡期之效應

由於混凝土的水化反應是硬固過程中相當重要的化學變化，我們可以發現不論水膠比為何，緻密性皆是隨著齡期增長而增加，這是由於水化作用仍不斷進行中，故同時強度也將持續發展【73】，相對的養護條件就顯得相當重要，養護條件良與否，有一定之影響強度，而在鹽霧室當中已提供了一個養護環境，隨著時間也會使得氯離子更加難以滲入；從圖 4-13 至 4-19 可看出各個配比在一個月和兩個月之後的氯離子分佈情形，編號 45-O、50-O、57-O 和 57-S20 這四組試體顯示：隨時間的增加，各深度的氯離子濃度也會穩定上升 $0.001\sim0.002\%$ ，擴散深度也分別增加了 $0.3\text{cm}\sim1.0\text{cm}$ 左右，其中 45-O 是變化最明顯和穩定的；而編號 45-S40 及 57-S40 兩組則呈現幾乎重合的曲線型態，可觀察出其水化反應和卜作嵐反應在這一個月當中仍然明顯的在進行，其緻密程度持續迅速地上升，使其內部無多餘氯離子的附著或是擴散；編號 45-S20 顯示：雖然試驗一個月的初始濃度高於兩個月後的結果，不過根據回歸出的氯離子擴散係數由 $6.693*10^{-8}(\text{cm}^2/\text{sec})$ 降低為 $4.009*10^{-8}(\text{cm}^2/\text{sec})$ ，也代表其緻密性在這一個月中依然是在提升，而初始濃度的不合理應該是由於表面取樣範圍內粗骨材佔體積的誤差影響所致。

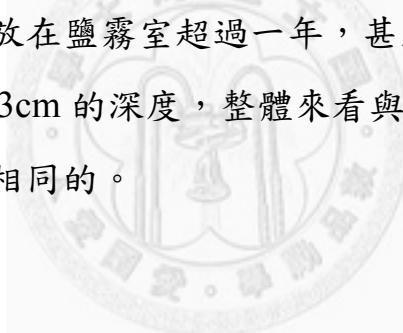
而由表 4-7 各試體的氯離子擴散係的變化可看出：水灰比 0.45、0.50、0.57 的普通混凝土，試驗齡期一個月和兩個月其擴散係數減少的比例為 12.3%、7.7% 和 5.7% 大約皆在 10% 上下，變化量可算是相當少，當中水灰比越低的試體其降低程度會越明顯；另外一部份有添加爐石的試體其氯離子擴散係數皆有明顯大幅度的下降，如 0.45 配比的試體在爐石取代 20% 時擴散係數降低了 40.1%，爐石取代值 40% 時則降低了 56.9%，0.57 配比的試體在爐石取代 20% 時擴散係數降低了 18.7%，爐石取代值 40% 時則降低了 26.4%，同樣在水膠比越低的試體上，會有較明顯的氯離子擴散係數的減少。所以可知降低水膠比以及增加爐石取代量，會讓齡期效應提前，也就是混凝土的緻密性會提升的更迅速。不過從一個月和兩個月的實驗數據可看出來：氯離子濃度並非隨著時間呈線性增加，所以我們可以把他分成兩個階段，第一階段為吸附階段，在這個階段內，混凝土內部存在許多的孔隙及裂縫，使氯離子很容易隨著液體或毛細現象侵入到混凝土內部；接下來的第二階段，是透過擴散行為使氯離子進一步滲入混凝土內部，這樣的過程更需要時間讓內部的氯離子濃度形成穩定的線性變化。

4.2.4 預測模式

由於透過此實驗是想更加掌握氯離子對鋼筋的侵蝕狀況，所以我們就已得到不同配比混凝土的氯離子擴散係數來做預測，欲預測出混凝土在鹽霧加速室內的氯離子滲透行為，透過此 Fick's 定律

$c = \frac{m}{\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right)$ 來做計算，實際上不同配比混凝土表面吸附氯離子的濃度會有些許差異，造成 m （總體氯離子濃度）值，不是一固定數值，不過在此為求統一性及計算的方便性，根據實驗結果取平均值

令 $m=0.26$ ，並假設混凝土保護層厚度為 3cm，氯離子濃度為 0.025(由於海砂屋的規範是每立方公尺含有的遊離態氯離子不可超過 0.3 公斤，換算氯離子濃度約 0.0125%，不過我們實驗得到的是包含固態吸附的氯離子，所以選擇以氯離子濃度 0.025 來討論)，再分別取表 4-5 各試體在一個月和兩個月試驗後所得氯離子擴散係數來計算，求得所需時間再換算為天數，見表 4-8。表中分成兩組預測日期，一組由一個月試驗結果推出之氯離子擴散係數 D_1 ，其二為試驗兩個月所得之氯離子擴散係數 D_2 ，由於擴散係數會隨著時間改變，而且當時間越長其越會趨於一個定值，所以用 D_2 來作為預測侵蝕的時間是相對於較為符合真實狀況的。從表中也可發現試體 57-O 是最快達成設定條件，大約只需要約四個月的時間，有添加爐石的日期也明顯較長，如 45-S20、57-S40 都要放在鹽霧室超過一年，甚至 45-S40 還要超過兩年的時間才會滲透到 3cm 的深度，整體來看與之前討論的水灰比效應與爐石取代效應是相同的。



4.3 長期濱海環境曝放條件

4.3.1 現地試驗之結果

表 4-9【1】有著現地試驗的實驗數據，這邊只選取放置於海洋大學濱海處的試體來做比較討論，因為其濃度相對其餘地區的試體是較高的，也符合當初設定濱海建築物的條件；文獻中也有相當詳盡每年的試驗數據，不過在暴露齡期 540 天以前的 4 個齡期之實驗，由於混凝土的第一層切片（距表面 0.5cm）之氯離子濃度約為 0.01%~0.06% 左右，根據試驗經驗與文獻結果顯示，其質仍屬微量，判定外界氯離子尚未入侵氯離子內部，因此這邊特別將 720、840、990 天的試驗數

據取出討論。將這三個齡期之試驗結果繪成曲線圖進行比較，觀察其氯離子含量分佈曲線圖 4-20~4-23，可發現氯離子隨著齡期而增加，以及有往混凝土內部逐步滲透的趨勢，此外，可發現試體 245-F 的氯離子含量最高，SCC-F 含量最低之趨勢也相當清楚。

4.3.2 鑽心試體之加速試驗

表 4-10、4-12 及圖 4-24、4-25 的氯離子濃度分佈可看出：在劣化一個月的結果中，245-1、350-1 和 II-1 三組的氯離子擴散深度大約都在 1.0cm 左右，只有 SCC-1 這組雖然起始濃度是最高的，卻因表 4-14 的氯離子擴散係數相當低，導致氯離子只進入到 0.6cm；而當劣化兩個月之後，SCC-2 這組深度達到近 1.0cm，350-2 和 II-2 接近 1.5cm，唯有 245-2 這組的氯離子滲入深度超過 2.0cm，不過由於這些試體距離澆製時間已經過了三年，所以水化反應可以認定已完成，從表 4-14 的氯離子擴散係數也可觀察出這兩個月的試驗結果並沒有太大的差距，理論上兩個月的氯離子擴散係數計算值應該要相等，估計當中的誤差和儀器在試驗過程中幾次的調整維修應該有關連；所以我們能將其取平均數，來作為長時間侵蝕情形之推估，設定條件與先前相同，令 $m=0.26$ （總體氯離子濃度），並假設混凝土保護層厚度為 3cm，氯離子濃度為 0.025，在分別推估所需時間，結果如表 4-15 所示，編號 245 的試體再不到五個月的時間就可以使氯離子達到指定條件，但 SCC 這組則需要花超過四年的時間，可見其緻密程度是相當細密有很強抵抗力的，這樣的結果與現地試驗的試驗數據得到了相同的結論。

比較特別的是 245 和 350 兩組試體在一個月和兩個月的試驗時間後，於深度 0.5 公分前皆有產生氯離子濃度的「峰值」，這是由於表

層的滲透行為主要是透過毛細吸收作用，但是當乾燥試驗進行時表層水分因風乾會向外蒸發，而氯離子則是藉由濃度梯度在向內部擴散，這種不斷的拉扯形成曲線的峰值，而又屬孔隙結構最鬆散的 245 試體的峰值最為明顯；另外從圖上現地試驗和加速試驗兩個月氯離子分佈圖的交會點可以得知，氯離子在表層 1~2 公分內的氯離子濃度接較現地試驗來的高，不過當更深入內部時期濃度下降的趨勢也更加迅速，代表氯離子大多還集中在表層 2 公分以內，由數據和擴散公式也可推得其擴散行為和時間會成正比。

4.3.3 結果之比較

從表 4-9【1】現地試驗曝放於海洋大學 720、840、990 天試體的氯離子濃度，和加速試驗一、兩個月試驗結果可發現：四種不同試體在現地曝放 720、840 或 990 天後，由圖 4-20~4-23 可知氯離子的分佈是相當穩定的呈遞減的趨勢擴散至混凝土內部，而加速試驗由於外在環境條件變化迅速，以及大量氯鹽於短時間內覆蓋於混凝土表層，強迫其進行吸收和蒸發擴散的蕊絲現象，力量梯度的增加也導致更快的滲入深度，不過實際氯離子含量卻因為時間不足，造成濃度仍舊偏低的情況發生。

若觀察圖 4-26、4-27 新拌試體 45-O (350) 和 57-O (245) 與鑽心試體結果的比較，兩組試體的滲入行為皆相當接近，57-O (245) 這組兩個月後的滲入深度皆為 2.2cm，而 45-O (350) 這組則是在一個月後的滲入深度相近，皆進入 1.0~1.2cm 的位置，不過在這些齡期已經超過三年的鑽心試體表層，氯離子濃度皆有產生濃度分佈的峰值產生，新拌試體則都沒有出現這樣的現象，其原因為鑽心試體由於

水化過程已經完成，孔隙的位置和數量皆已經不會再改變，所以氯離子的向內擴散傳輸，和因風乾的向外蒸散行為隨著時間將氯離子累積在 0.5cm 處，進而形成實驗數據所得之峰值；若再加上現地曝放的試驗結果來討論，就也需要考量養護環境的影響因素，由於現地曝放的試體於養護完成後及吊運至預定曝放地點放置，即開始接受環境的劣化試驗，其間的天候狀況也不是實驗人員所能掌控；反觀實驗室內的鹽霧加速試驗，是在設定好的條件下使試體經歷固定和穩定的乾濕循環，其間也有潮濕及高溫的設定環境，與養護條件的「高溫養護」有相近之處，混凝土在當中同時進行劣化及養護的行為，也會導致其水化反應的進行及緻密性持續增加，讓氯離子滲入行為較無法穩定預測。

若從圖 4-26、4-27 中我們可以探討用加速試驗模擬現地氯離子滲入試驗的關係，同樣選擇以氯離子濃度 0.025% 的深度作為滲入深度來討論，觀察各試體於氯離子濃度 0.025% 時深度為多少公分，記錄於表 4-16 並分別就 45-O (350) 和 57-O (245) 兩組對照圖 4-28 現地試驗氯離子滲入深度與日期之關係圖，並找出模擬現地曝放之日期；由表 4-17 可發現當實驗試體進入鹽霧室達一個月的時間後，其氯離子擴散深度約在 1.0~1.7cm，對照圖 4-26 可推估約相等於現地放置 800~860 天左右的日期；而劣化兩個月之後的擴散深度約在 1.3~2.1cm 左右，對照現地試驗結果為 875~965 天；由此可知第一個月的模擬天數成長最快，28 天的加速試驗就可以模擬兩年三個月左右的現實狀況，不過再增加一個月的實驗後，結果只增加約三個月的現地氯離子擴散量，雖無法得知其之間更確切的關連性，不過可以見得在劣化行為上確實能節省相當多的時間；另一部份整體觀察新拌試體的模擬天數，比鑽心出試體所模擬的天數顯得較高，其原因為水化反

應在這幾個月當中仍然在持續進行，還有許多孔隙和通路讓水及氯離子較輕易的進行傳輸，與鑽心出已完成水化反應之試體不同，導致其滲入量和速度會較快，所以若需模擬長時間的情況，還是建議以齡期較長的試體來進行加速試驗較為合適。

4.4 綜合分析比較

表 4-15 列出 12 篇相關研究的文獻，皆為近十年來國內外學者所做研究，而這些資料的實驗時間大多集中在 2008~2010 期間，這當中有 8 篇是將混凝土放入乾濕循環的環境下探討氯離子滲入的行為，而有 3 篇是現地試驗的試驗結果，本節會從當中的試驗方法、計算方式、試驗結果與本研究的過程來做比較討論，以期對此研究找出更加的實驗方法和模式。

4.4.1 試驗方法之討論

與各實驗比較後，發覺若只要觀測氯離子擴散係數的變化，如不同水灰比或卜作嵐摻料對氯離子擴散係數的影響，則實驗齡期大多在一個月內所蒐集的數據就可以完成，若需瞭解混凝土較完整的耐久性相關指標，則會增加其餘試驗以供對照，如：快速氯離子穿透試驗、鋼筋腐蝕速率、電阻率等試驗來相互比較；而文獻【54, 74】想瞭解長期氯離子滲入濃度和深度的變化關係，就會進行將近 200 天，時間較長的加速試驗。而另一方面各文獻中配比設計的範圍皆在 0.35~0.55 之間，與現實常使用的配比相同，各個文獻當中也有一半的試驗是有添加卜作嵐摻料，探討其對抗氯離子滲入行為之影響，所有配比

中也有少數水灰比設計超過 0.55 甚至到 0.65，其目的皆是為了增加氯離子滲入的濃度和速率，減少試驗時間而設計，相對較不符合現實實際的運用情形。

而與此類似的主題也有在探討潮汐帶結構物的氯鹽侵蝕行為，因此區域介於高低潮位之間，由於受到海水漲退潮的影響，結構表面週期性的接觸海水浸泡及曝露於大氣中，較容易迅速的劣化而降低其服務年限，且相對也更符合乾濕循環的條件，不過這部分議題就沒有在本研究範圍之內。

4.4.2 計算方式之討論

本研究之氯離子擴散係數的求取，是透過電位滴定而得到各試體氯離子濃度與深度的關係，接著使用 DeltaGraph 的繪圖軟體，繪出分佈圖後使用於第二章提到 Fick's 定律 $c = \frac{m}{\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right)$ 的計算公式，以 m（總體氯離子濃度）、D（氯離子擴散係數）為變數進行回歸分析，來求得氯離子擴散係數的計算值，而各試體實際回歸圖見圖 4-29~4-38。

由於本實驗於計算氯離子濃度時，會將試體於不同深度時做全斷面磨粉取樣，雖然磨出的粉末較為細密，操作起來也較為方便，但缺點是會將粗骨材也同時磨成粉末狀，無法判斷其含量之比例亦無法將之剔除。曾用數學的方式計算一層的斷面粉末會含有多少比例的粗骨材，並於最後予以排除，經比較其餘學者所做之近年研究多為採全部試體粉末來量測，原因為透過前述之回歸分析計算即可排除粗骨材於試體內之影響，但也因此會造成起始濃度較不統一之差異；而較早期之氯離子濃度研究之試體取樣作法較為不同，以往會將圓柱試體使用

沖孔機在其中心位置之垂直面鑽出約 2cm 直徑的圓柱體，再由表面約每間隔 0.5cm 切取一試片，後經搗碎過篩得其粉末作量測，但此作法只能量測到 0.5cm 厚度內混凝土的氯離子濃度，無法得到更細微的資料，並且也會有刀片厚度 0.2cm 造成的切割損失，雖在搗碎的過程中可以將可分辨的粗骨材剔除，但反而造成更大的誤差影響，所以近年來皆使用全斷面磨粉的方式取得試樣。實驗進行中也曾考慮計算時取多個試體測定，再取其平均值以得更精確的數值，查閱大多試驗皆認為使用一個試體即可代表整體行為，所以大部分文獻皆沒有做多餘之試體取樣，所以在本實驗設計中並沒有安排在同樣齡期下的重複試驗。

不過由不同實驗的氯離子分佈曲線來觀察，可發現其各取樣點之間由於厚度達 0.5cm，產生較不易觀察不同配比造成的微量變化，如峰值的產生，或起始濃度的差異現象，因為氯離子在擴散至混凝土試體內部時，由於擴散係數的差異以及粗骨材分佈的空間位置，會造成其濃度擴散並不是呈一平滑曲線，但當取樣厚度增加，把頭尾的差異平均化，就不易觀察較實際的氯離子擴散行為，像本研究與文獻【54】在開頭約取 0.2cm 為一間距，向內深入後約增加到 0.3cm，雖有較多的不規則變化，卻因此能更仔細觀察出不同配比和爐石取代後造成的影響。

4.4.3 綜合分析

由其他文獻所計算得到的氯離子擴散係數，和本試驗結果近似，可見混凝土本身配比是影響氯離子擴散係數最主要關鍵，文獻【75-76】皆表明水灰比下降、卜作嵐摻料增加對氯離子擴散係數的影響是明顯

與穩定減少的，且在混凝土深度 0.5cm 處有可能出現氯離子濃度的峰值【54, 72】，但根據不同的配比和相異實驗環境條件及時間作用下，其餘試驗的試體皆沒有這種現象的發生，後推測其為需要有較長的乾燥時間讓孔隙內水分能完全蒸散導致，因本試驗設定一段行程的乾燥時間只有兩小時，並且在各行程的轉換之間也會有緩衝漸變期，與對照試驗的六天乾燥時間差距甚大；在氯離子滲入深度的結果比較，隨時間不同及水膠比或礦物摻料的差異會有不同的滲入深度，但整體來看，試驗齡期一個月大約能使外部進入的氯離子擴散至距表面 1.5cm 處，但劣化時間一拉長，就和循環頻率及水膠比有較直接的關係，不易整理出預估深度，還是從氯離子擴散係數和設定時間來預估會較為準確，並且實驗用長期放置之試體，或是已經完成水化反應的試體較為恰當，如圖 4-43、4-44，現地試驗對照加速試驗關係圖，可看出鑽心試體的曲線呈較穩定的幅度在上升，相較於新拌試體持續在進行水化反應及卜作嵐反應，較長期的實驗試體不易受前期混凝土內部化學反應影響。

第五章 結論與建議

5.1 結論

本研究主要透過製造鹽霧環境來模擬濱海的環境，探討於不同水膠比及爐石摻料影響下氯離子的擴散行為，以及欲找出現地試驗及實驗室加速試驗的關連性，由試驗結果與分析比較後，歸納出下列幾點結論：

- (1) 氯離子滲入混凝土的行為呈現由外而內遞減的趨勢，與 Fick 第二擴散定理的線性假設是符合的，也因此證明了該定理運用在研究氯離子滲透的合理性及可行性，由此可知之後透過表面的氯離子濃度和材料的氯離子擴散係數，及可透過此公式推導內部一定深度的氯離子濃度，對鋼筋腐蝕提供參考數值。
- (2) 試驗證明氯離子的擴散深度與時間亦存在正向關係，隨著時間的增加，氯離子滲入的深度及濃度亦增加。
- (3) 水灰比效應：從實驗結果可知，當水灰比提升時會產生更多孔隙，而導致氯離子擴散係數跟著提升，不過由於加速環境仍舊有提供養護作用，會導致持續進行水化反應，並造成不同水灰比試體緻密性差距程度持續增加。
- (4) 爐石取代效應： 爐石取代水泥會提升孔隙的緻密性，同時明顯的降低氯離子擴散係數，並且在爐石取代水泥比率 40%以前有氯離子擴散係數呈遞減的趨勢；當水膠比越低以及爐石取代量越高時，會有更佳混凝土緻密性的提升，但也由於爐石混凝土其吸附氯離子能力較佳，導致初始濃度較一般普通混凝土來的高；此外有含爐石的試體，其氯離子擴散係數隨時間降低的速度

度會較純水泥的試體來的迅速。

- (5) 齡期時間效應：氯離子擴散係數和氯離子濃度都和時間的變化相關，氯離子擴散係數會隨著時間增加而減少，表明氯離子擴散係數主要受水泥水化以及爐石卜作峽反應的影響，在普通混凝土試體中，各分層的濃度和氯離子擴散深度則會隨著時間而增加，但其濃度並非與時間呈線性比例上升，當混凝土中的爐石取代量達一定程度時，氯離子的滲入量則會降到相當低的程度，並且逐漸達到穩定的情況；另外當試驗時間以及乾燥時間越長，越容易出現表層氯離子濃度有峰值的產生。
- (6) 透過實驗的交叉對照，並取較長期試驗所得的氯離子擴散係數，可推導出氯離子擴散的預測模式，根據不同配比試體可推估在加速環境下，在四個月到兩年的時間即可讓氯離子突破鋼筋保護層直接接觸到排有鋼筋之位置。
- (7) 加速試驗對現地曝放的模擬效果：雖然取相同的試體在實驗室做加速試驗，以及重新澆製相同配比的混凝土，但由於初始(表面)濃度相當高，以及時間因素過短的影響，還無法確切模擬出現地曝放情況，不過透過氯離子於不同試體短時間內擴散深度，可概略預測其侵蝕時間，也同時需更多的後續試驗證實此假設。
- (8) 和其餘研究比較後，本實驗採用全斷面磨粉取樣屬能觀測至間距較短之實驗值方式，能得到較多的實驗值，在回歸氯離子擴散係數以及觀察其行為能減少誤差影響。

5.2 建議

綜合上述之結論與試驗結果做出下列幾點建議：

- (1) 欲提升混凝土的抗氯離子滲入能力，應選用較低的水灰比配比，或是增加爐石取代水泥的取代量，由本實驗中可得提升至 40% 的取代量時會有最佳效果。
- (2) 誤差影響：鹽霧室內需有放置試體的支架，但由於內部是一潮濕且腐蝕性強的環境，所以支架的使用材質及防止鏽蝕的表面處理需注意，避免鐵鏽覆蓋混凝土表面造成實驗結果影響；而鹽霧試驗室本身的不穩定性較高，曾造成跳電或溫濕度不穩定之情形，需隨時注意其運轉狀況；並且氯離子濃度容易受各種因素影響，建議之後可用多個試體的試驗值取平均求得較合理的實驗值。
- (3) 未來之相關研究可嘗試討論變換不同實驗變因，使氯離子的滲入速率增加，以減少實驗等待時間及模擬更長久的現地曝放效果，例如：調配濃度更高的鹽水、加速循環溫度濕度的設定、循環頻率的更改、甚至是養護方式的改變，這些都是近幾年各國學者在嘗試的方法，不過由於有許多研究者共同使用此空間，若需調整溫濕度或是頻率，就需和其他研究者取得共識或協調使用時間。
- (4) 氯離子擴散係數的回歸是一統計上的推估值，建議試驗時可在允許範圍內增加試體取樣深度，以及增長實驗時間，至少進行劣化達六個月，雖會增加實驗時間及複雜度，但能更加符合氯離子滲入的實際情況。
- (5) 因本實驗得到的數據並不是很多，還無法建立起完整鹽霧試驗下氯離子於混凝土中擴散關係的模型，反觀這類型研究的現地

曝放試驗，國外已經有數十年以上試驗齡期的研究，再配合加速試驗和劣化試驗來做對照討論，建議國內之後相關研究也能建立起更長期的試驗方式，來得到更加符合實際鋼筋混凝土結構物侵蝕行為的資料。

- (6) 由於此研究室本實驗室首次嘗試，對於儀器操作、方法選用、實驗流程和數據分析上，皆經歷許多嘗試來找出最合適的步驟，期許能把這些經驗和學習紀錄和傳承，讓之後的研究者更順利的進行相關研究。



參考文獻

- 【1】 台灣營建研究院，「台灣苗栗以北地區大氣中氯鹽與橋梁腐蝕劣化環境之研究第四年期中報告」， 2009。
- 【2】 Meira, G. R., Andrade, M. C., Padaratz, I. J., Alonso, M. C., and Borba, J. J. C., "Measurements and modelling of marine salt transportation and deposition in a tropical region in Brazil," *Atmospheric Environment*, vol. 40, pp. 5596-5607, 2006.
- 【3】 Castro, P., De Rincon, O. T., and Pazini, E. J., "Interpretation of chloride profiles from concrete exposed to tropical marine environments," *Cement and Concrete Research*, vol. 31, pp. 529-537, 2001.
- 【4】 Mehta, P. and Monteiro, P. J. M., *Concrete Structure, Properties and Materials*. N.J.: Prentice- Hall inc., Englewood-Cliffs, 1986.
- 【5】 黃兆龍，「混凝土性質和行為」，台北，廣昌出版社， 1987。
- 【6】 Young, J. F. and Mindness, S., *Concrete*. N.J.: Prentice Hall, 1987.
- 【7】 Mehta, P. K. and Monteiro, P. J. M., *Concrete-structure, properties, and materia*: Prentice Hall, 1993.
- 【8】 Power, T. C., "Permeability of Portland cement paste," *Journal of the American Concrete Institute*, vol. 26, pp. 285-298, 1954.
- 【9】 Chindaprasirt, P., Rukzon, S., and Sirivivatnanon, V., "Resistance to chloride penetration of blended Portland cement mortar containing palm oil fuel ash, rice husk ash and fly ash," *Construction and Building Materials*, vol. 22, pp. 932-938, 2008.
- 【10】 Enevoldsen, J. N., Hansson, C. M., and Hope, B. B., "Binding of chloride in mortar containing admixed or penetrated chloride," *cement &*

Concrete Research, vol. 24, pp. 1525-1533, 1994.

【11】 Wu, X., Xu, L., Yang, Q., and Huang, S., "The diffusion equation of chloride ions in cement mortar," *Trans Shanghai Building Materials Collection*, vol. 4, pp. 364-372, 1991.

【12】 陳立軍,「混凝土滲透性概念的細化及其測試方法」, *混凝土*, vol. 01 , 2009 。

【13】 Johannesson, B. F., "Diffusion of a mixture of cations and anions dissolved in water," *cement & Concrete Research*, vol. 29, pp. 1261-1270, 1999.

【14】 Conciatori, D., Laferrière, F., and Brühwiler, E., "Comprehensive modeling of chloride ion and water ingress into concrete considering thermal and carbonation state for real climate," *Cement and Concrete Research*, vol. 40, pp. 109-118, 2010.

【15】 Climent, M. A., de Vera, G., López, J. F., Viqueira, E., and Andrade, C., "A test method for measuring chloride diffusion coefficients through nonsaturated concrete: Part I. The instantaneous plane source diffusion case," *Cement and Concrete Research*, vol. 32, pp. 1113-1123, 2002.

【16】 Bentz, P., Garboczi, E., and Lagergren, E., "Multi-Scale Microstructural Modeling of Concrete Diffusivity : Identification of Significant Variables," *Cement Concrete and Aggregates*, vol. 20, pp. 129-139, 1998.

【17】 John, L. and Matthew, M., "Predicting Chloride Diffusion Coefficients from Concrete Mixture Proportions," *ACI Materials Journal*, vol. 96, pp. 698-702, 1999.

【18】 Crank, J., *The Mathematics of Diffusion*, 1959.

【19】 William D. Callister, *Fundamentals of materials Science and*

Engineering, 2001.

- 【20】 de Rincón OTO , "Chloride profiles in two marine structures--meaning and some predictions," *Building and Environment*, vol. 39, pp. 1065-1070, 2004.
- 【21】 Uji, K., Matsuoka, Y., and Maruya, T., "Formation of an equation for surface chloride content of concrete due to permeation of chloride," *Corrosion of reinforcement in concrete*, pp. 258-267, 1990.
- 【22】 Mangat, P. S. and Gurusamy, K., "Chloride diffusion in steel fibre reinforced marine concrete," *Cement and Concrete Research*, vol. 17, pp. 385-396, 1987.
- 【23】 Mangat, P. S. and Gurusamy, K., "Chloride diffusion in steel fibre reinforced concrete containing PFA," *Cement and Concrete Research*, vol. 17, pp. 640-650, 1987.
- 【24】 Thomas, M. D. A. and Bamforth, P. B., "Modelling chloride diffusion in concrete: Effect of fly ash and slag," *Cement and Concrete Research*, vol. 29, pp. 487-495, 1999.
- 【25】 陳春雷，「乾溼循環下混凝土中氯離子的一些擴散特性」，*混凝土*，vol. 03， 2009。
- 【26】 Pack, S.-W., Jung, M.-S., Song, H.-W., Kim, S.-H., and Ann, K. Y., "Prediction of time dependent chloride transport in concrete structures exposed to a marine environment," *Cement and Concrete Research*, vol. 40, pp. 302-312, 2010.
- 【27】 Audenaert, K., Yuan, Q., and De Schutter, G., "On the time dependency of the chloride migration coefficient in concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 24, pp. 396-402, 2010.
- 【28】 Zhang, T. and Gjørv, O. E., "Effect of Chloride Source Concentration on Chloride Diffusivity in Concrete," *ACI Materials*

Journal, vol. 102, 2005.

【29】 楊仲家，「混凝土耐久性試驗研究」，臺北市，內政部建築研究所，2004。

【30】 Yuan, Y., "Comparison of Two Accelerated Corrosion Techniques for Concrete Structures," *ACI Structural Journal*, vol. Vol.104, 2007.

【31】 黃兆龍，「鋼筋混凝土施工技術與結構物腐蝕防治研討會論文輯」，1994。

【32】 Detwiler, R. J., Kjellsen, K. O., and Gjørv, O. E., "Resistance to Chloride Intrusion of Concrete Cured at Different Temperatures," *ACI Materials Journal*, vol. 88, pp. 19-24, 1991.

【33】 Mehta, P. K., *Pozzolanic and Cementitious by Products as Mineral Admixtures for Concrete-A Critical Review*: ACI SP-79, 1983.

【34】 林炳炎，「飛灰・矽灰・高爐爐石用在混凝土中」，1993。

【35】 ACI-Committee226, "Silica Fume in Concrete," *ACI Materials Journal*, vol. 84, pp. 158-166, March 1, 1987.

【36】 李修齊，「高強度混凝土水中磨耗性質之機理探討」碩士論文，國立台灣大學土木工程學研究所，1997。

【37】 宋佩瑄，「矽灰在混凝土工程上之發展與應用」，結構工程，vol. 3，pp. 113-120，1988。

【38】 賴正義，「高飛灰量混凝土性質」，台電工程月刊，vol. 551，1994。

【39】 謙穎雯，「環境溫、濕度對含高爐石、飛灰與普通卜特蘭水泥混凝土強度之影響與變形之研究」，碩士論文，國立台灣大學土木工程學研究所，1986。

【40】 陳振川，「飛灰與爐石混凝土性質與其工程應用」，結構工程，vol. 2，pp. 87-94，1987。

【41】 中鋼集團，「爐石利用推廣手冊」，高雄，中鋼公司工安環保處，1999。

【42】 行政院公共工程委員會，「公共工程高爐石混凝土使用手冊」，台北，行政院公共工程委員會，2001。

【43】 洪文方，「普通水泥中添加高爐熟料之影響」，碩士論文，國立台灣大學土木工程學研究所，1985。

【44】 日本土木學會，「高爐石粉末應用於混凝土施工指針」，日本土木學會，1996。

【45】 Luo, R., Cai, Y., Wang, C., and Huang, X., "Study of chloride binding and diffusion in GGBS concrete," *Cement and Concrete Research*, vol. 33, pp. 1-7, 2003.

【46】 陳清泉、陳振川，「爐石為水泥熟料與添加料對混凝土特性影響之文獻及國外現況調查研究」，台灣營建研究中心報告，1987。

【47】 林建宏，「爐石混凝土水中磨耗性質研究」，碩士論文，國立台灣大學土木工程學研究所，2004。

【48】 Lim, S. N. and Wee, T. H., "Autogenous Shrinkage of Ground-Granulated Blast-Furnace Slag Concrete," *ACI Materials Journal*, vol. 97, pp. 587-593, 2000.

【49】 ACI-Committee233, *Ground Granulated Blast-Furnace Slag as a Cementitious Constituent in Concrete*. Detroit: American Concrete Institute, 1996.

【50】 Videla, C. and Gaedicke, C., "Modeling Portland Blast-Furnace Slag Cement High-Performance Concrete," *ACI Materials Journal*, vol. 101, 2004.

【51】 Hogan, F. J. and Meusel, J. W., "Evaluation for Durability and Strength Development of a Ground Granulated Blast Furnace Slag,"

Cement Concrete and Aggregates, vol. 3, pp. 40-52, 1981.

【52】 Ganesh Babu, K. and Sree Rama Kumar, V., "Efficiency of GGBS in concrete," *Cement and Concrete Research*, vol. 30, pp. 1031-1036, 2000.

【53】 Hooton, R. D. and Emery, J. J., "Sulfate resistance of a Canadian slag cement," *ACI Materials Journal*, vol. 87, pp. 547-555, 1990.

【54】 Rob B.Polder and Willy H. A.Peelen, "Characterisation of chloride transport and reinforcement corrosion in concrete under cyclic wetting and drying by electrical resistivity," *Cement and Concrete Composites*, vol. 24, pp. 427-435, 2002.

【55】 Melchers, R. E. and Li, C. Q., "Reinforcement corrosion initiation and activation times in concrete structures exposed to severe marine environments," *Cement and Concrete Research*, vol. 39, pp. 1068-1076, 2009.

【56】 Ahmed, M. S., Kayali, O., and Anderson, W., "Evaluation of Binary and Ternary Blends of Pozzolanic Materials Using the Rapid Chloride Permeability Test," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 21, pp. 446-453, 2009.

【57】 Bermudez, M. A. and Alaejos, P., "Models for Chloride Diffusion Coefficients of Concretes in Tidal Zone," *ACI Materials Journal*, vol. 107, pp. 3-11, 2010.

【58】 Gjørv, O. E. and Vennesland, Ø., "Diffusion of chloride ions from seawater into concrete," *Cement and Concrete Research*, vol. 9, pp. 229-238, 1979.

【59】 Osborne, G. J., "Durability of Portland blast-furnace slag cement concrete," *Cement & Concrete Composites*, vol. 21, pp. 11-21, 1999.

【60】 詹穎雯，「灰爐石混凝土之原理、性質與應用」，飛灰爐石於

混凝土工程之合理運用研討會論文集，台北市，台灣營建研究院，1999。

【61】 Prince, W., Pérami, R., and Espagne, M., "Mechanisms involved in the accelerated test of chloride permeability," *Cement & Concrete Research*, vol. 29, pp. 687-694, 1999.

【62】 Wee, T. H., Suryavanshi, A. K., and Tin, S. S., "Influence of aggregate fraction in the mix on the reliability of the rapid chloride permeability," *Cement & Concrete Composites*, vol. 21, 1999.

【63】 葉世文，楊仲家，「混凝土中氯離子擴散基本試驗法探討」，內政部建築研究所，2006。

【64】 Yang, C. C. and Wang, L. C., "The diffusion characteristic of concrete with mineral admixtures between salt ponding test and accelerated chloride migration test," *Materials Chemistry and Physics*, vol. 85, pp. 266-272, 2004.

【65】 林維明，「高爐石水泥混凝土耐海水試驗」，混凝土技術研討會論文輯，pp. 202-215，1993。

【66】 Maruya, T., Matsuoka, Y., and Tangtermsirikul, S., "Simulation of Chloride Movement in Hardened Concrete," *Concrete Library of JSCE*, vol. 20, pp. 57-70, 1992.

【67】 Maruya, T., Matsuoka, Y., and Tangtermsirikul, S., "Modeling of Chloride Ion Movement in The Surface Layer of Hardened Concrete," *Concrete Library of JSCE*, vol. 32, pp. 69-84, 1998.

【68】 余红发，「混凝土在多重因素作用下的氯离子扩散方程」，建築材料學報，vol. 5，2002。

【69】 Song, H. W., Lee, C. H., and Ann, K. Y., "Factors influencing chloride transport in concrete structures exposed to marine environments," *Cement and Concrete Composites*, vol. 30, pp. 113-121,

2008.

【70】 劉軍，「模擬大氣氯離子對混凝土作用的研究方法」，*混凝土*，vol. 11， 2008。

【71】 衛軍，「干濕循環條件下氯離子對鋼筋混凝土材料的影響研究」，*混凝土*， vol. 2， pp. 4-6， 2010。

【72】 Bohni, H., *Corrosion in reinforced concrete structures*. London: Woodhead company, 1994.

【73】 連育德，「高細度爐石粉高強度混凝土之配比與性質研究」，碩士論文，國立台灣大學土木工程學研究所，2009。

【74】 Meijers, S. J. H., Bijen, J. M. J. M., Borst, R. d., and Fraaij, A. L. A., "Computational results of a model for chloride ingress in concrete including convection , drying - wetting cycles and carbonation," *materials and structures*, vol. 38, pp. 145-154, 2005.

【75】 勾峰，「混凝土中氯離子擴散性能研究」，*建築*， vol. 08， pp. 65-66， 2010。

【76】 丁平華，「干濕循環作用下混凝土抗氯離子侵蝕研究」，*福建建築*， vol. 12， pp. 3-5， 2009。

表 2-1 波特蘭水泥複合物成分含量【6】

成分 水泥種類	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	MgO	SO ₂	燃燒 損失	Free CaO
Type I	49	26	11	8	3.0	2.2	1.3	1.0
Type II	46	30	6	12	2.1	2.1	1.5	1.2
Type III	55	14	10	7	2.1	2.8	1.5	1.6
Type IV	30	47	5	13	2.1	2.1	1.4	0.8
Type V	41	36	4	10	2.8	1.9	1.3	0.8

表 2-2 波特蘭水泥成分之特性【6】

		C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
水和作用速率		快	慢	極快	—
水和熱量		120 cal/g	62 cal/g	207 cal/g	100 cal/g
粘結力	早期(1, 2 天)強度	佳	差	佳	差
	極限強度	佳	佳	差	差

表 2-3 鹽害各階段過程劣化的定義【1】

劣化 過程	定義	決定期間的因素
潛伏期	於鋼材上出現徵候位置的氯化物離子濃度達到發生腐蝕界線濃度的期間	氯化物離子的擴散初期所含氯化物離子濃度
進展期	鋼材開始腐蝕進展至發生腐蝕龜裂的期間	鋼材的腐蝕速度
加速期	因為發生腐蝕龜裂而腐蝕進行速度加快的期間	有龜裂狀況下的鋼材腐蝕速度
劣化期	由於鋼材腐蝕量的增加而呈現耐負荷力顯著下降的期間	

表 2-4 混凝土鹽害階段性的檢測建議項目【1】

劣化過程	外觀變狀	氯離子濃度	碳化深度	鋼材腐蝕	混凝土強度	耐荷重性	鋼材位置	劣化外力	監測
潛伏期	◎	◎	◎	○	△	△	◎	◎	△
進展期	◎	◎	◎	◎	△	△	○	○	△
加速期	◎	◎	○	◎	○	○	△	△	△
劣化期	◎	○	△	◎	◎	○	△	△	△

◎:必須實施的項目 △:必要時才實施的項目 ○:希望實施的項目

表 2-5 卜作嵐材料之化學成分【33】

化學名稱	一般水泥	高爐熟料	矽灰	飛灰	稻殼灰
氧化矽(SiO ₂)	20.69	28~38	94~98	20~60	92.15
氧化鋁(Al ₂ O ₃)	5.72	8~24	0.10~0.40	10~35	0.41
氧化鐵(Fe ₂ O ₃)	3.29	—	0.02~0.15	5~35	0.21
氧化鈣(CaO)	63.91	30~50	0.08~0.30	1~20	0.41
氧化鎂(MgO)	2.04	1~18	0.30~0.90	0.3~4.0	0.45
氧化硫(SO ₃)	2.72	1~2.5	—	0.1~1.2	—
氧化鉀(KaO)	0.01	—	0.20~0.70	0.8~0.9	2.31
氧化鈉(Na ₂ O)	0.01	—	0.10~0.40	0.25	0.08
碳(C)	—	—	0.20~1.30	—	—
燒失量(LOI)	1.06	—	0.80~1.50	4.0~6.5	2.77
游離石灰(f-cao)	1.5	—	—	—	—

表 3-1 台泥品牌第 I 型卜特蘭水泥化學成份

試 驗 報 告				
化 學 成 分		檢 驗 結 果	規範值 %	
			I	IA
二氧化矽	SO ₂ %	21.04	-	-
氧化鋁	A ₂ O ₃ %	6.24	-	-
氧化鐵	F ₂ O ₃ %	3.06	-	-
氧化鈣	CaO %	63.86	-	-
氧化鎂	MgO %	1.54	≤6.0	≤6.0
二氧化硫	C ₃ A≤8	-	≤3.0	≤3.0
	SO ₃ %	2.02	≤3.5	≤3.5
燒失量 %		1.04	≤3.0	≤3.0
不溶殘渣 %		0.16	≤4.3	≤0.75
矽酸三鈣	C ₃ S %	48	-	-
矽酸三鈣	C ₂ S %	24	-	-
矽酸三鈣	C ₃ A %	11.4	-	-
矽酸三鈣	C ₄ AF %	9.3	-	-
備 註				

表 3-2 台泥品牌第 I 型卜特蘭水泥物理性質

試 驗 報 告				
物理性質		檢 驗 結 果	規範值 %	
			I	IA
細度透氣儀試驗 m ² /kg		352	≥280	≥280
熱壓膨脹 %		1	≤0.80	≤0.80
凝結時間	初凝 min	215	≥45	≥45
	終凝 min	286	≤375	≤375
空氣含量 體積百分 率	最大值 %	CNS1163(1986) 7.4	≤12	≤22
	最小值 %		-	≥16
備 註				

表 3-3 高爐石之物理與化學性質

試驗項目		試驗結果	規範要求	試驗方法 (CNS)
物理性質	比重	2.89	Min. 2.80	11272
	細度，比表面積 m^2/kg	600	Min. 330	2924
	熐料之空氣含量 %	9.39	Max. 12	
	活性指數 %	7 天指數	任一個別試樣 - 70 90	1010
		80 級		
		100 級		
		120 級		
		28 天指數	任一個別試樣 - 70 90 100	1010
		80 級		
		100 級		
		120 級		
化學性質	細度，試驗篩 0.045mm 濕篩殘留 %	5.4	Max. 20	11273
	硫化物硫(S) %	0.05	Max. 2.5	1078
	硫酸鹽硫(以 SO_3 表示) %	0.43	Max. 4.0	

表 3-4 粗骨材之篩分析與物理性質

料別	粗骨材		
	累積留篩		過篩百分率
篩號	公克	百分率	
1 1/2	0.00	0.000	100.000
3/4	0.00	0.000	100.000
3/8	1215.00	52.461	47.539
No.4	1076.00	98.921	1.079
No.8	23.00	99.914	0.086
No.16	0.74	99.946	0.054
No.30	0.35	99.961	0.039
No.50	0.00	99.961	0.039
No.100	0.00	99.961	0.039
底盤	0.91	100.000	0.000
合計	2316.00		
細度模數 F.M.	5.511623		
面乾內飽和比重	2.622		
面乾內飽和水量百分率	1.22%		
吸水率	1.23%		

表 3-5 細骨材之篩分析與物理性質

料別	細骨材		
	累積留篩		過篩百分率
篩號	公克	百分率	
No. 4	22.13	4.435	95.565
No. 8	32.85	11.019	88.981
No. 16	67.81	24.610	75.390
No. 30	139.06	52.481	47.519
No. 50	181.97	88.953	11.047
No. 100	47.36	98.445	1.555
No. 200	4.35	99.317	0.683
底盤	3.41	100.000	0.000
合計	498.94		
細度模數 F.M.	2.799		
比重	2.47		
面乾內飽和水量百分率	2.39%		
吸水率	2.44%		

表 3-6 試驗配比表

編號	W/C	水泥	爐石	粗骨材	細骨材	水	總重
45-O	0.45	409	0	966	842	184	2401
45-S20	0.45	328	82	966	842	184	2401
45-S40	0.45	246	164	966	842	184	2401
50-O	0.50	434	0	847	903	217	2400
57-O	0.57	319	0	939	960	183	2401
57-S20	0.57	255	64	939	960	183	2401
57-S40	0.57	191	128	939	960	183	2401

表 3-7 試體編碼表（新拌試體組）

NEW			
試驗時間		1 月	2 月
水灰比	爐石取代		
0.45	0%	45-O-1	45-O-2
	20%	45-S20-1	45-S20-2
	40%	45-S40-1	45-S40-2
0.57	0%	57-O-1	57-O-2
	20%	57-S20-1	57-S20-2
	40%	57-S40-1	57-S40-2
0.50	0%	50-O-1	50-O-2

表 3-8 公路局試體配比表

編號	W/C	水泥	爐石	飛灰	粗骨材	細骨材	水	化學摻料
245	0.574	300	0	0	914	935	178	4.65
350	0.450	400	0	0	945	823	180	2.20
SCC	0.400	255	85	85	761	952	170	4.25
II	0.450	400	0	0	945	823	180	2.20

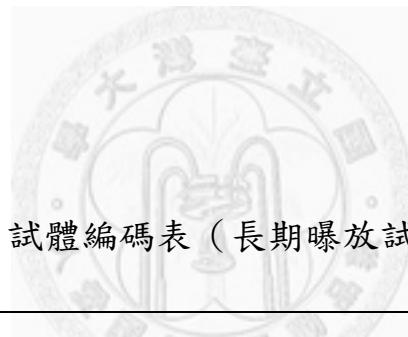


表 3-9 試體編碼表 (長期曝放試體組)

DGH					
試體名稱		245	350	SCC	II
試驗時間	1 月(加速)	245-1	350-1	SCC-1	II-1
	2 月(加速)	245-2	350-2	SCC-2	II-2
	720 天(現地)	245-F-720	350-F-720	SCC-F-721	II-F-720
	840 天(現地)	245-F-840	350-F-840	SCC-F-840	II-F-840
	990 天(現地)	245-F-990	350-F-990	SCC-F-990	II-F-990

表 4-1 新拌試體氯離子濃度分佈試驗結果（一個月）

深度 (cm)	氯離子濃度 (%)						
	45-O-1	45-S20-1	45-S40-1	50-O-1	57-O-1	57-S20-1	57-S40-1
0.1	0.2033	0.5767	0.5133	0.3467	0.2733	0.2433	0.3767
0.3	0.1600	0.4767	0.3733	0.3167	0.2200	0.2267	0.2667
0.6	0.1267	0.3467	0.1967	0.2400	0.1700	0.1667	0.1867
0.9	0.0733	0.1500	0.1200	0.1033	0.1367	0.0967	0.1000
1.2	0.0000	0.0833	0.0000	0.0867	0.1200	0.0700	0.0000
1.5	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0667	0.0000	0.0000

表 4-2 新拌試體氯離子含量（一個月）

深度 (cm)	氯離子含量 (kg/m ³)						
	45-O-1	45-S20-1	45-S40-1	50-O-1	57-O-1	57-S20-1	57-S40-1
0.1	4.880	13.840	12.320	8.320	6.560	5.840	9.040
0.3	3.840	11.440	8.960	7.600	5.280	5.440	6.400
0.6	3.040	8.320	4.720	5.760	4.080	4.000	4.480
0.9	1.760	3.600	2.880	2.480	3.280	2.320	2.400
1.2	0.000	2.000	0.000	2.080	2.880	1.680	0.000
1.5	0.000	0.000	0.000	0.000	1.600	0.000	0.000

表 4-3 新拌試體氯離子濃度分佈試驗結果（兩個月）

深度 (cm)	氯離子濃度 (%)						
	45-O-2	45-S20-2	45-S40-2	50-O-2	57-O-2	57-S20-2	57-S40-2
0.13	0.3225	0.2833	0.4068	0.2368	0.2420	0.1963	0.3452
0.35	0.2728	0.2845	0.3350	0.3237	0.2003	0.2545	0.3635
0.63	0.1798	0.2025	0.1913	0.2623	0.2017	0.2003	0.1897
1.03	0.1560	0.1098	0.0717	0.1342	0.1857	0.1180	0.0785
1.35	0.0822	0.0000	0.0000	0.1235	0.1097	0.0943	0.0000
1.75	0.0350	0.0000	0.0000	0.0000	0.0863	0.0000	0.0000
2.15	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2.55	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

表 4-4 新拌試體氯離子含量（兩個月）

深度 (cm)	氯離子含量 (kg/m ³)						
	45-O-2	45-S20-2	45-S40-2	50-O-2	57-O-2	57-S20-2	57-S40-2
0.13	7.740	6.800	9.764	5.684	5.808	4.712	8.284
0.35	6.548	6.828	8.040	7.768	4.808	6.108	8.724
0.63	4.316	4.860	4.592	6.296	4.840	4.808	4.552
1.03	3.744	2.636	1.720	3.220	4.456	2.832	1.884
1.35	1.972	0.000	0.000	2.964	2.632	2.264	0.000
1.75	0.840	0.000	0.000	0.000	2.072	0.000	0.000
2.15	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2.55	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

表 4-5 新拌試體氯離子擴散係數

試體 編號	氯離子擴散係數 ($10^{-8} \text{cm}^2/\text{sec}$)	
	一個月	兩個月
45-O	8.640	7.582
45-S20	6.693	4.009
45-S40	4.337	1.871
50-O	9.019	8.326
57-O	13.370	12.615
57-S20	9.560	7.773
57-S40	4.386	3.229



表 4-6 新拌試體氯離子擴散係數關係

試體 比較	擴散係數降低比(%)	
	一個月	兩個月
45-O→50-O	-4.4	-9.8
45-O→57-O	-54.7	-66.4
45-O→45-S20	22.5	47.1
45-O→45-S40	49.8	75.3
57-O→57-S20	28.5	38.4
57-O→57-S40	67.2	74.4

(負號代表上升)

表 4-7 齡期與擴散係數關係

齡期 比較	擴散係數降低比(%)
	1 月～2 月
45-O	12.3
45-S20	40.1
45-S40	56.9
50-O	7.7
57-O	5.7
57-S20	18.7
57-S40	26.4

表 4-8 氯離子侵蝕預測日期

試體 編號	預測侵蝕時間 (日)	
	D ₁	D ₂
45-O	188	214
45-S20	243	405
45-S40	375	869
50-O	180	195
57-O	122	129
57-S20	170	209
57-S40	371	503

表 4-9 現地曝放試驗氯離子濃度【1】

	深度 (cm)	氯離子濃度 (%)			
		245	350	SCC	II
720 天	0.3	0.048	0.034	0.023	0.032
	0.5	0.041	0.030	0.018	0.029
	1	0.030	0.018	0.015	0.020
	2	0.017	0.010	0.009	0.009
	2.5	0.013	0.007	0.008	0.005
840 天	0.3	0.056	0.041	0.033	0.042
	0.5	0.050	0.036	0.021	0.037
	1	0.036	0.023	0.015	0.025
	2	0.023	0.013	0.011	0.012
	2.5	0.018	0.012	0.009	0.009
	3	0.014	0.012	0.009	0.008
	4	0.009	0.009	0.007	0.008
	5	0.008	0.009	0.005	0.007
990 天	0.3	0.057	0.047	0.036	0.047
	0.5	0.049	0.042	0.025	0.042
	1	0.041	0.031	0.02	0.032
	2	0.032	0.026	0.019	0.021
	2.5	0.028	0.023	0.016	0.019
	3	0.023	0.02	0.014	0.017

表 4-10 公路局試體氯離子濃度分佈試驗結果（一個月）

深度 (cm)	氯離子濃度 (%)			
	245-1	350-1	SCC-1	II-1
0.05	0.223	0.137	0.353	0.240
0.25	0.250	0.133	0.127	0.177
0.45	0.233	0.117	0.067	0.170
0.65	0.203	0.113	0.000	0.100
0.85	0.117	0.057	0.000	0.083
1.05	0.000	0.000	0.000	0.000

表 4-11 公路局試體氯離子含量（一個月）

深度 (cm)	氯離子含量 (kg/m ³)			
	245-1	350-1	SCC-1	II-1
0.05	5.360	3.280	8.480	5.760
0.25	6.000	3.200	3.040	4.240
0.45	5.600	2.800	1.600	4.080
0.65	4.880	2.720	0.000	2.400
0.85	2.800	1.360	0.000	2.000
1.05	0.000	0.000	0.000	0.000

表 4-12 公路局試體氯離子濃度分佈試驗結果（兩個月）

深度 (cm)	氯離子濃度 (%)			
	245-2	350-2	SCC-2	II-2
0.10	0.208	0.159	0.432	0.200
0.35	0.252	0.163	0.233	0.200
0.65	0.247	0.140	0.075	0.176
1.00	0.191	0.076	0.000	0.117
1.40	0.126	0.000	0.000	0.060
1.80	0.113	0.000	0.000	0.000
2.20	0.000	0.000	0.000	0.000

表 4-13 公路局試體氯離子含量（兩個月）

深度 (cm)	氯離子含量 (kg/m ³)			
	245-2	350-2	SCC-2	II-2
0.10	4.984	3.812	10.364	4.804
0.35	6.044	3.904	5.596	4.796
0.65	5.928	3.360	1.804	4.224
1.00	4.584	1.820	0.000	2.808
1.40	3.012	0.000	0.000	1.432
1.80	2.720	0.000	0.000	0.000
2.20	0.000	0.000	0.000	0.000

表 4-14 鑽心試體氯離子擴散係數

試體 編號	氯離子擴散係數($10^{-8} \text{cm}^2/\text{sec}$)		
	一個月	兩個月	平均
245	10.684	12.139	11.412
350	6.749	7.221	6.985
SCC	0.935	1.202	1.069
II	7.272	7.405	7.339

表 4-15 鑽心試體預測侵蝕時間

試體 編號	平均氯離子 擴散係數 ($10^{-8} \text{cm}^2/\text{sec}$)	預測侵蝕 時間(日)
245	11.412	142
350	6.985	233
SCC	1.069	1520
II	7.339	221

表 4-16 各試驗氯離子滲入深度比較

試體 種類	氯離子 0.025% 深度 (cm)	
	245 (0.57)	350 (0.45)
DGH-1	1.0	1.0
DGH-2	2.1	1.3
NEW-1	1.7	1.1
NEW-2	2.0	1.9
F-720	1.4	0.7
F-840	1.8	1.0
F-990	2.8	2.1

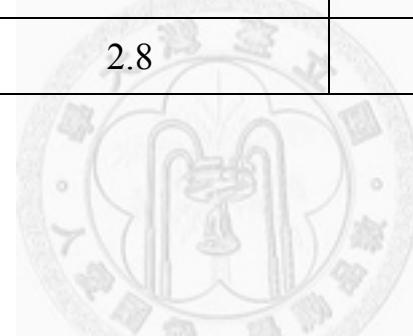


表 4-17 加速試驗模擬現地試驗關係表

試體 種類	加速模擬現地 天數 (日)	
	245 (0.57)	350 (0.45)
DGH-1	* < 600	840
DGH-2	890	885
NEW-1	820	860
NEW-2	875	965

(打*者為推估值)

表 4-18 國內外相關文獻討論比較表

作者	名稱	文獻來源	年份
Rob B.Polder	Characterisation of chloride transport and reinforcement corrosion in concrete under cyclic wetting and drying by electrical resistivity	Cement and Concrete Composites, vol. 24	2002
Meijers, S. J. H.	Computational results of a model for chloride ingress in concrete including convection , drying - wetting cycles and carbonation	materials and structures, vol. 38	2005
Song, Ha Won	Factors influencing chloride transport in concrete structures exposed to marine environments	Cement and Concrete Composites, vol. 30	2008
P. Castro	Interpretation of chloride profiles from concrete exposed to tropical marine environments	Cement and Concrete Research, vol. 31	2001
G. R. Meira	Measurements and modelling of marine salt transportation and deposition in a tropical region in Brazil	Atmospheric Environment, vol. 40	2006
楊仲家	混凝土耐久性試驗研究	內政部建築研究所	2004
陳春雷	乾溼循環下混凝土中氯離子的一些擴散特性	混凝土, vol. 03	2009
衛軍	干濕循環條件下氯離子對鋼筋混凝土材料的影響研究	混凝土, vol. 2	2010
丁平華	干濕循環作用下混凝土抗氯離子侵蝕研究	福建建築, vol. 12	2009
閻西康	模擬大氣中氯離子在混凝土中擴散的鹽霧試驗研究	混凝土, vol. 02	2010
廖健宏	飛來鹽份環境下水泥質材料曝放條件參數之調查	高雄第一科技大學	2008
勾峰	混凝土中氯離子擴散性能研究	建築, vol. 08	2010

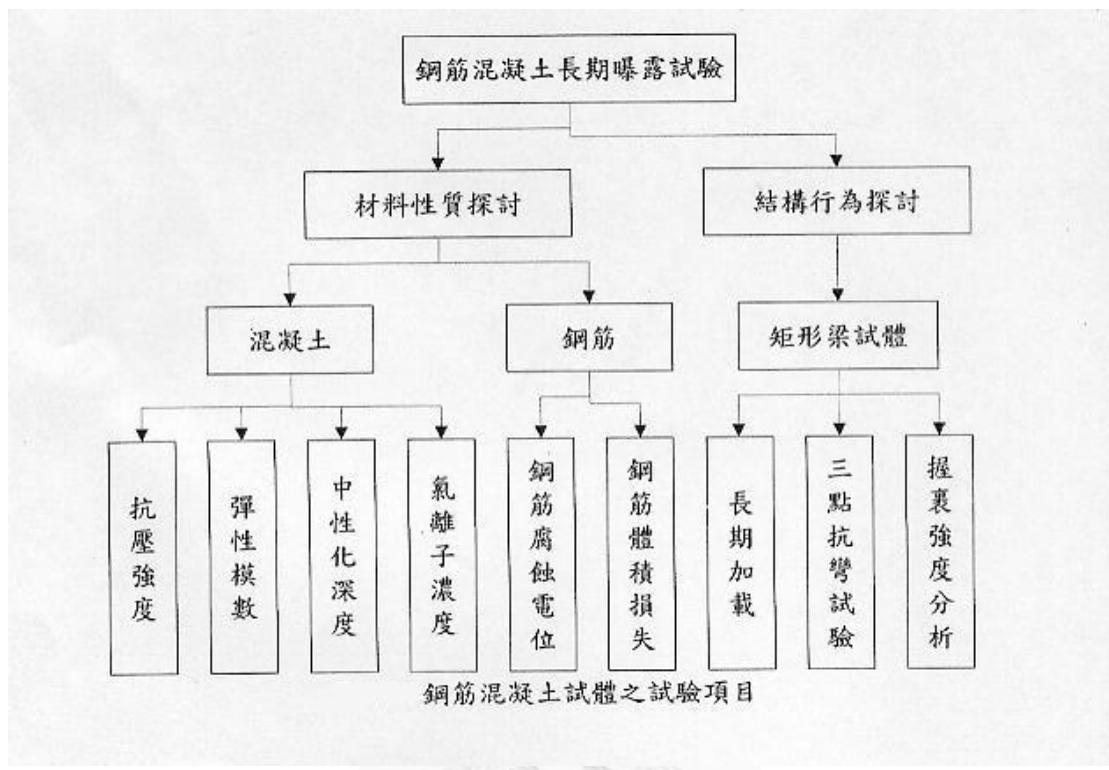


圖 1-1 混凝土試體試驗項目【1】

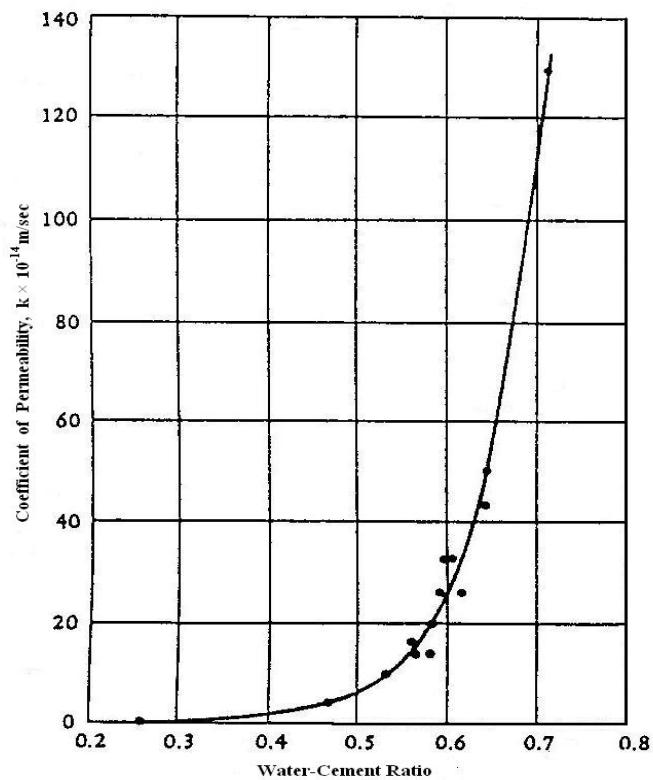


圖 2-1 水灰比對滲透性之影響【4】

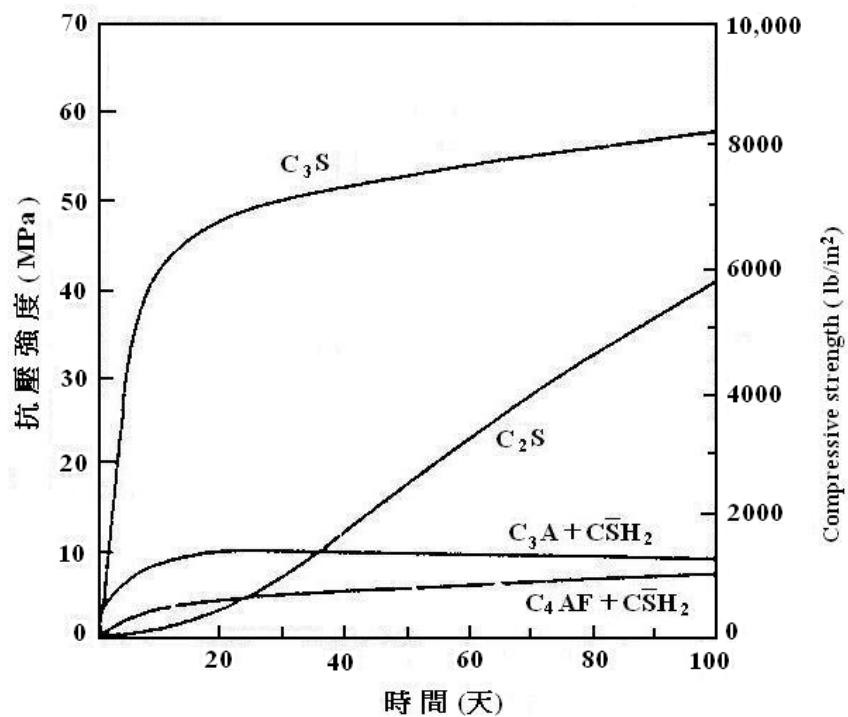


圖 2-2 水泥熟料單礦物漿體之抗壓強度發展【6】

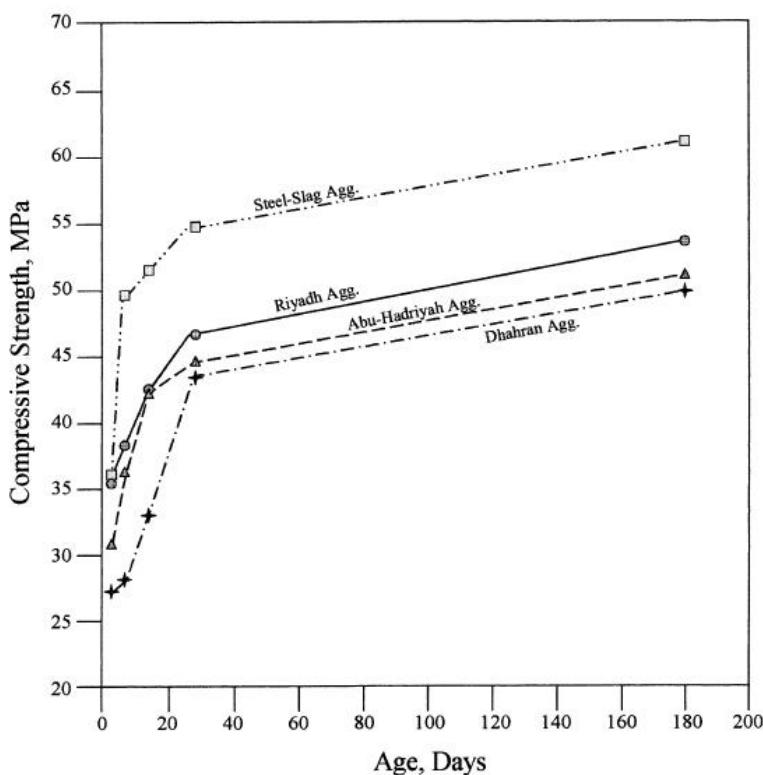


圖 2-3 粗骨材種類與抗壓強度之關係圖【6】

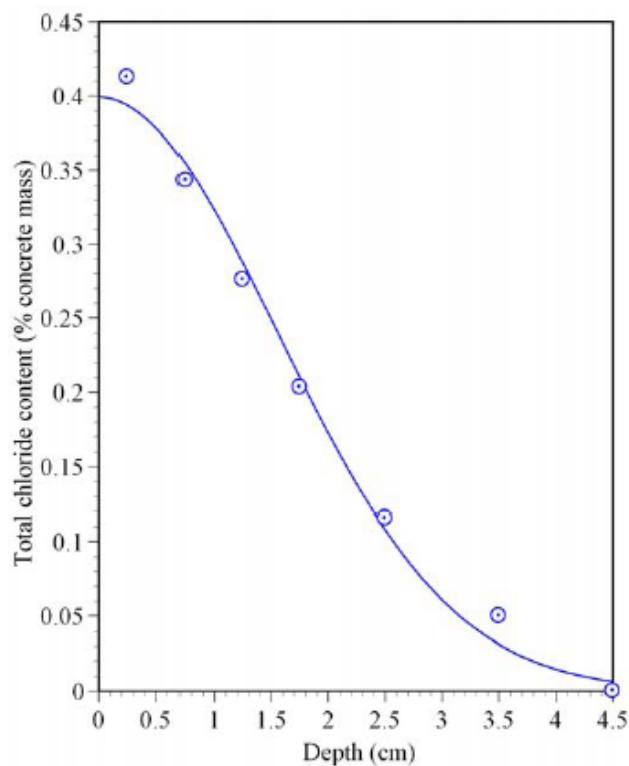


圖 2-4 典型的深度-氯離子含量圖

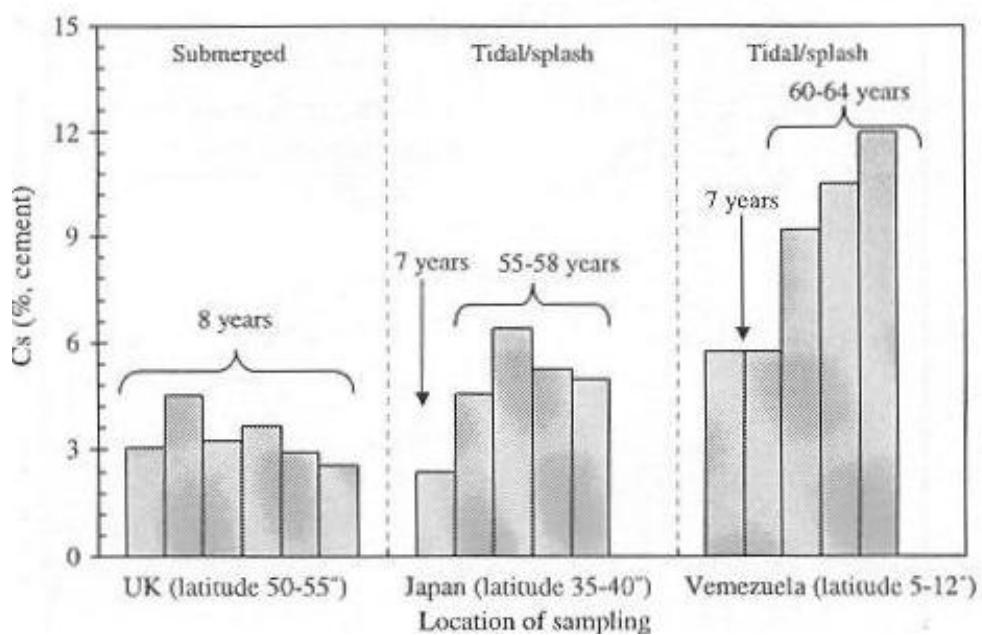


圖 2-5 結構表面氯離子濃度（英國、日本、委內瑞拉）【20】

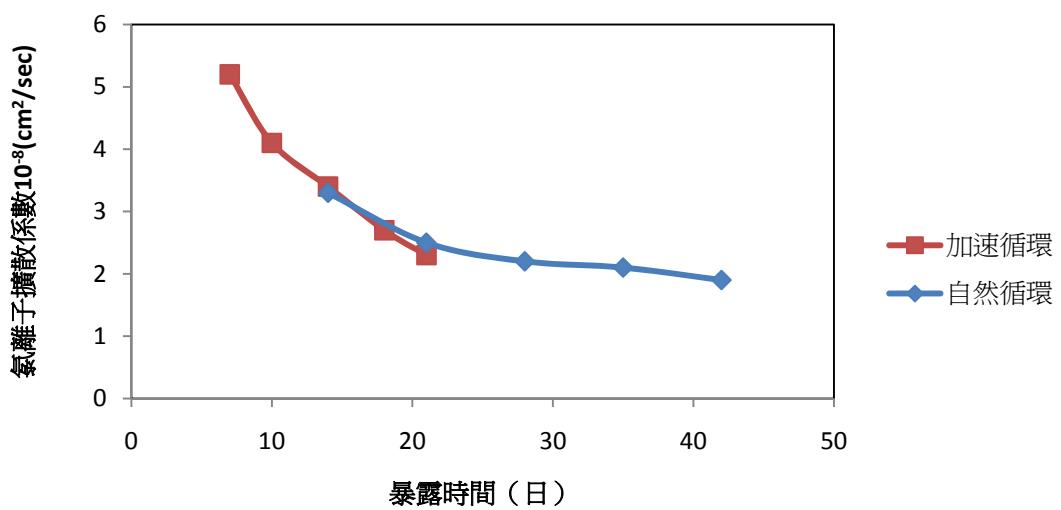


圖 2-6 氯離子擴散係數與暴露時間的關係【25】

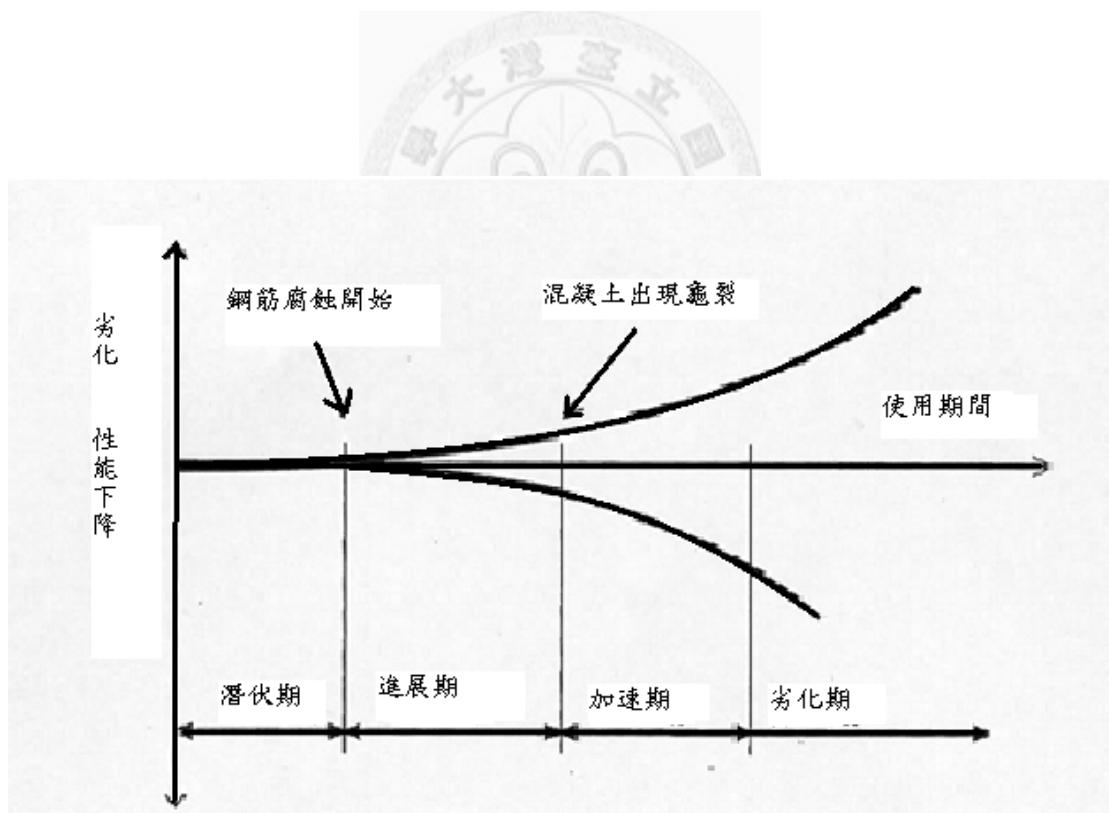


圖 2-7 鋼筋混凝土劣化過程【1】

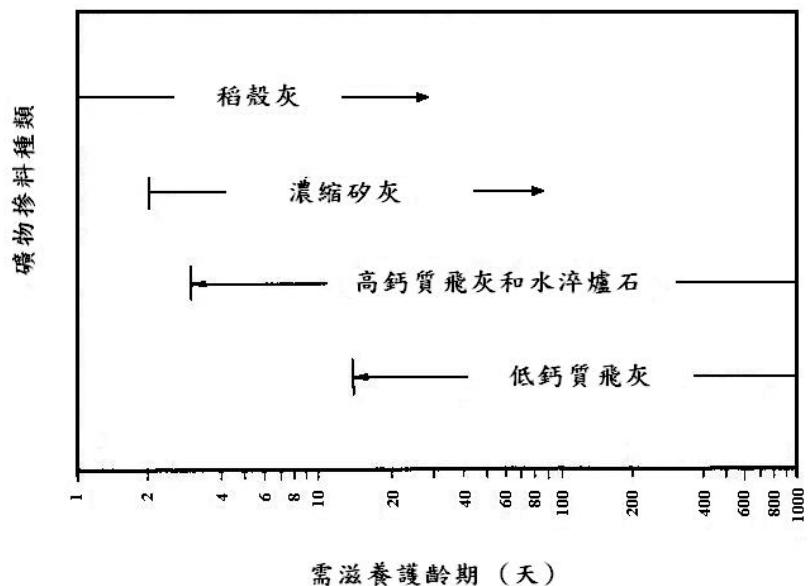


圖 2-8 不同卜作嵐材料強度產生之齡期【33】

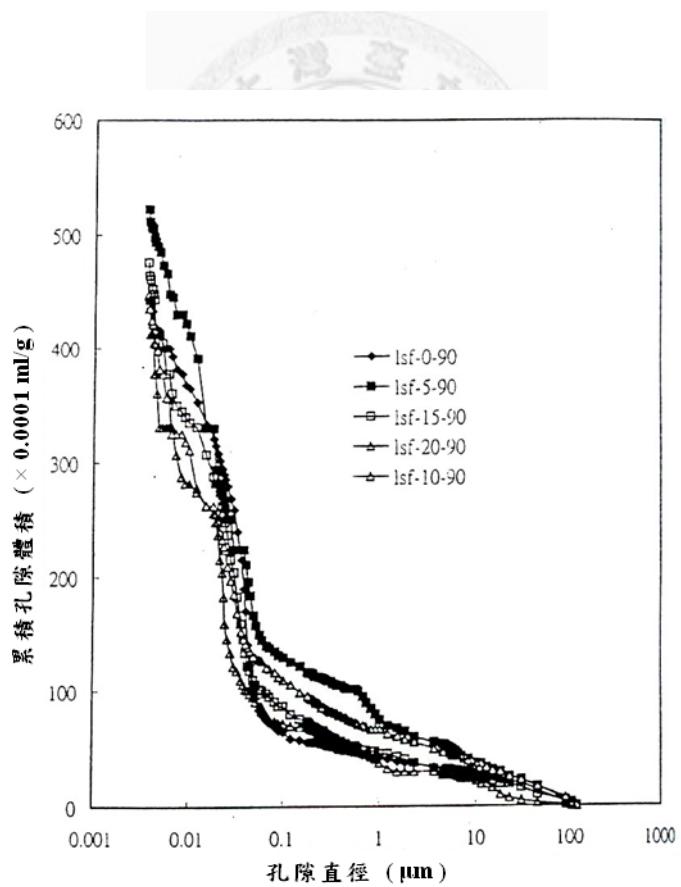


圖 2-9 砂灰混凝土之孔隙累積圖【36】

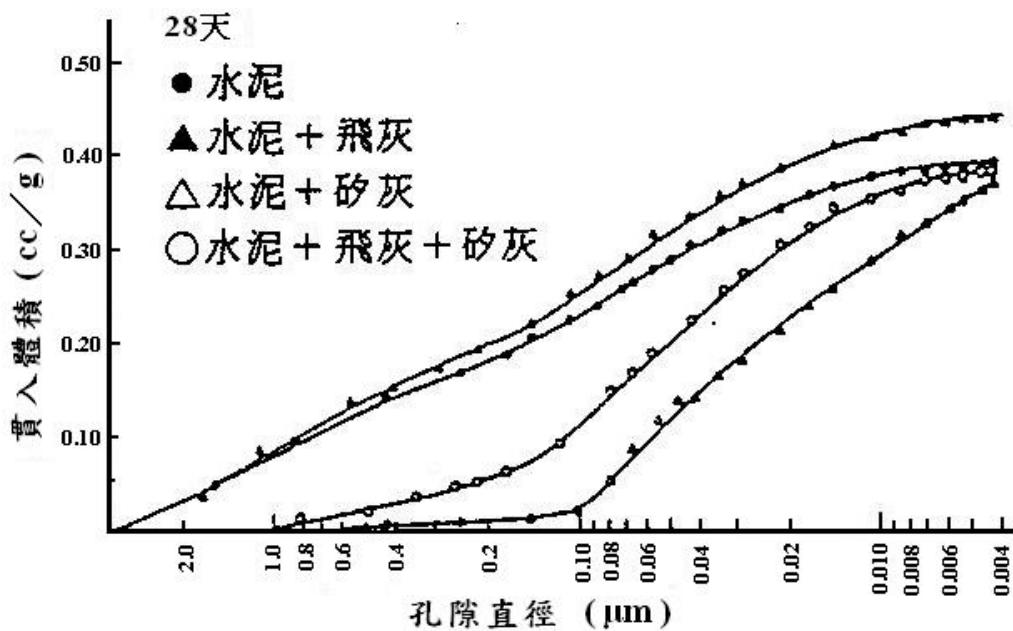


圖 2-10 混凝土添加砂灰與飛灰孔隙直徑與灌入體積圖【37】

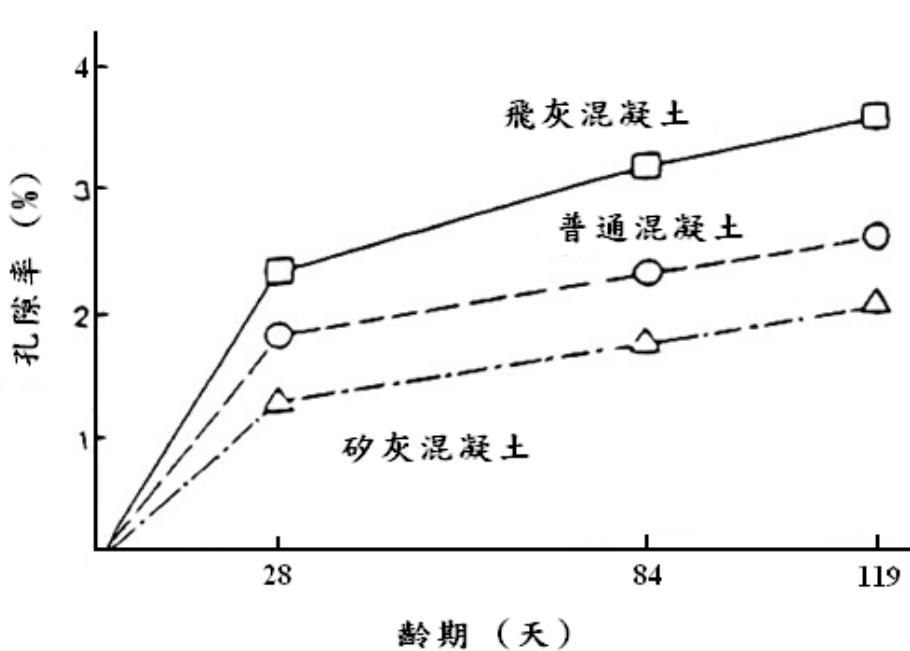


圖 2-11 含矽灰與飛灰混凝土養護齡期與孔隙率關係圖【37】

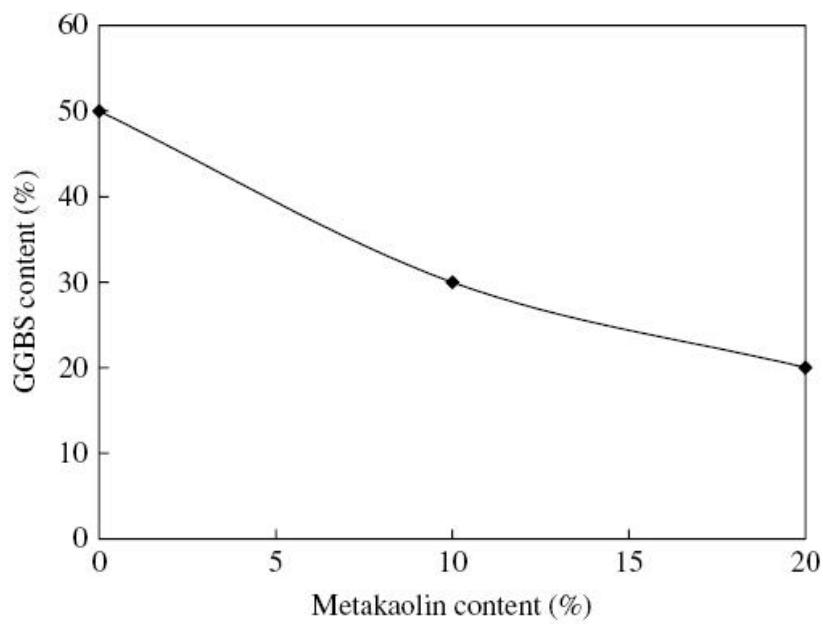


圖 2-12 Metakaolin 與爐石含量比例之最佳強度關係圖【42】

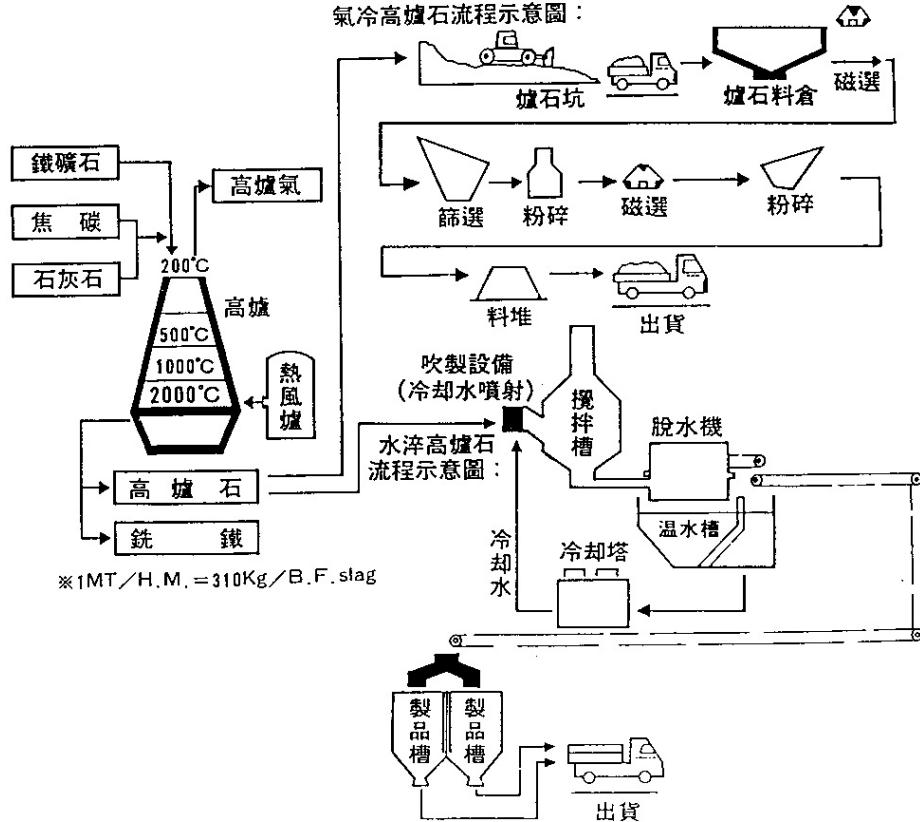
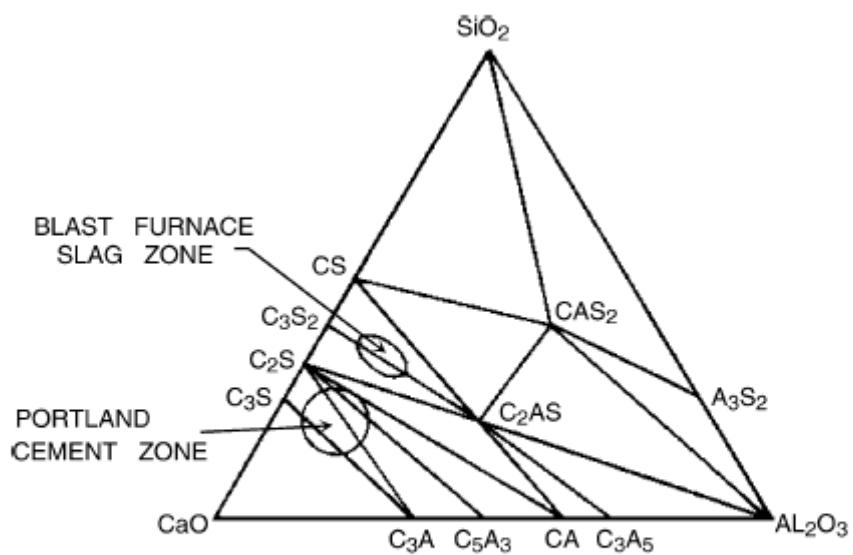


圖 2-13 高爐石生產流程示意圖【41】



● Ternary diagram indicating composition of PC and GGBFS in the $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$.

圖 2-14 波特蘭水泥與爐石之三相圖【33】

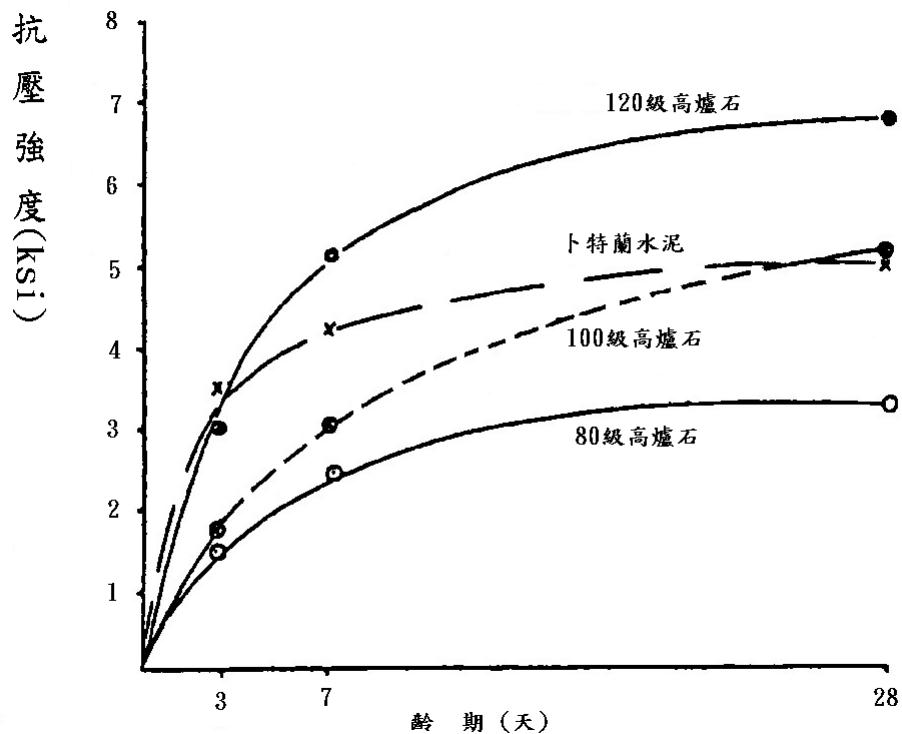


圖 2-15 爐石粉水泥砂漿強度成長趨勢【49】

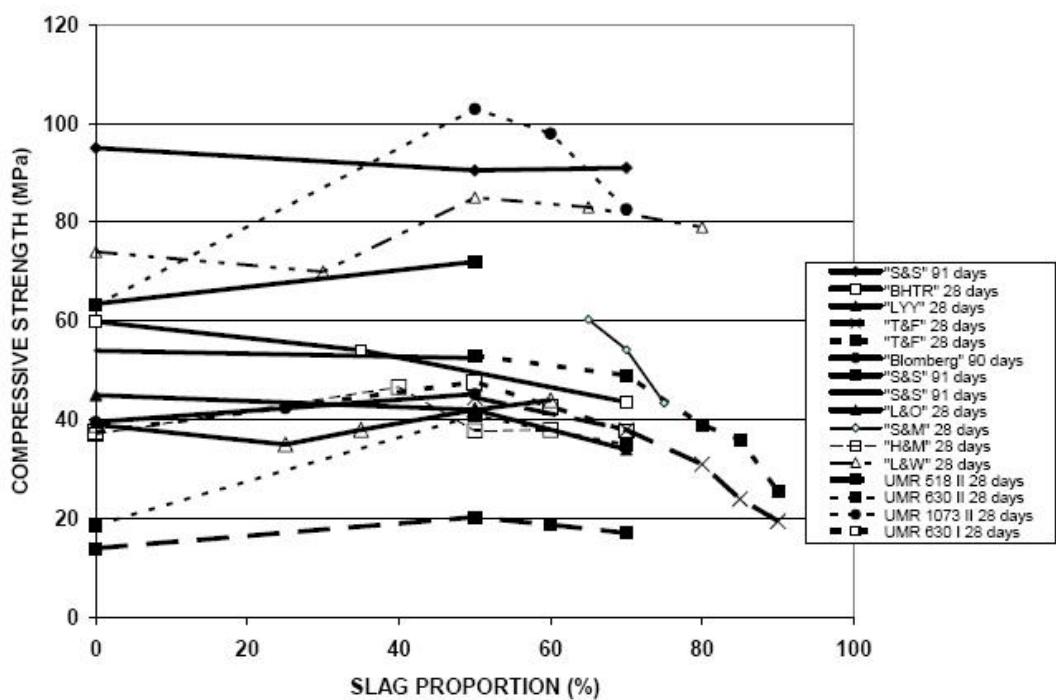


圖 2-16 爐石粉取代與抗壓強度之關係圖【49】

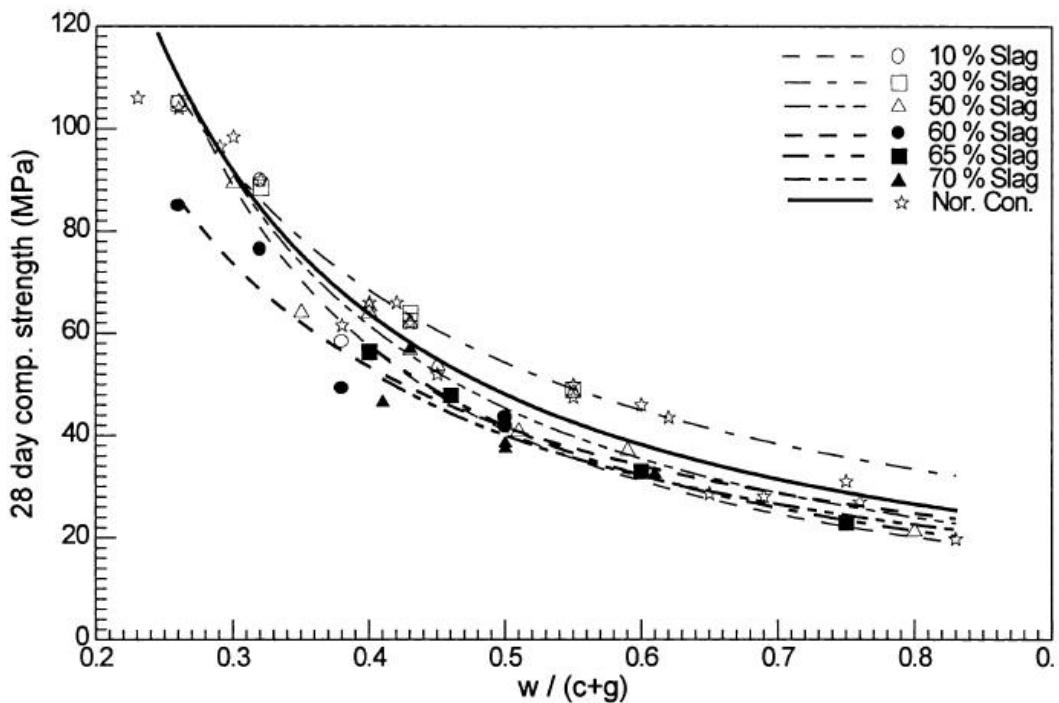


圖 2-17 爐石粉取代與水膠比之強度關係圖【52】

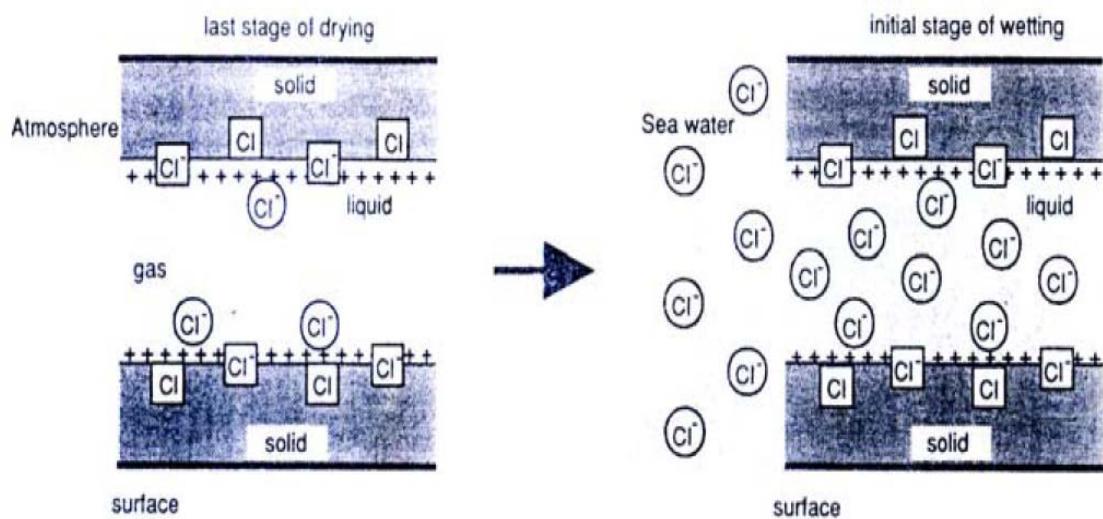


圖 2-18 乾濕交替之際氯離子滲透的機制【66】

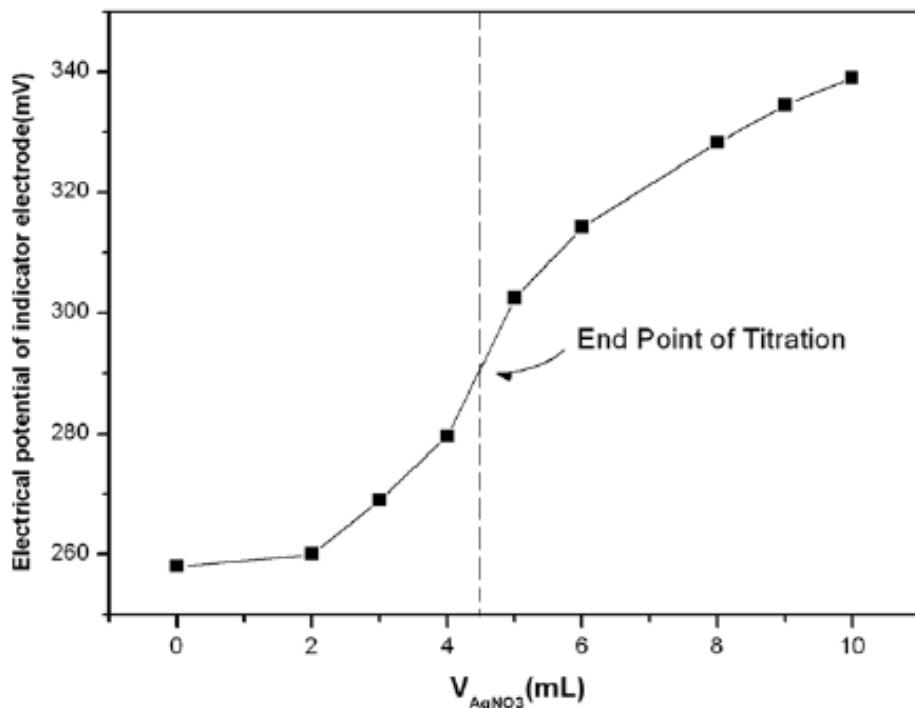


圖 2-19 電位滴定曲線

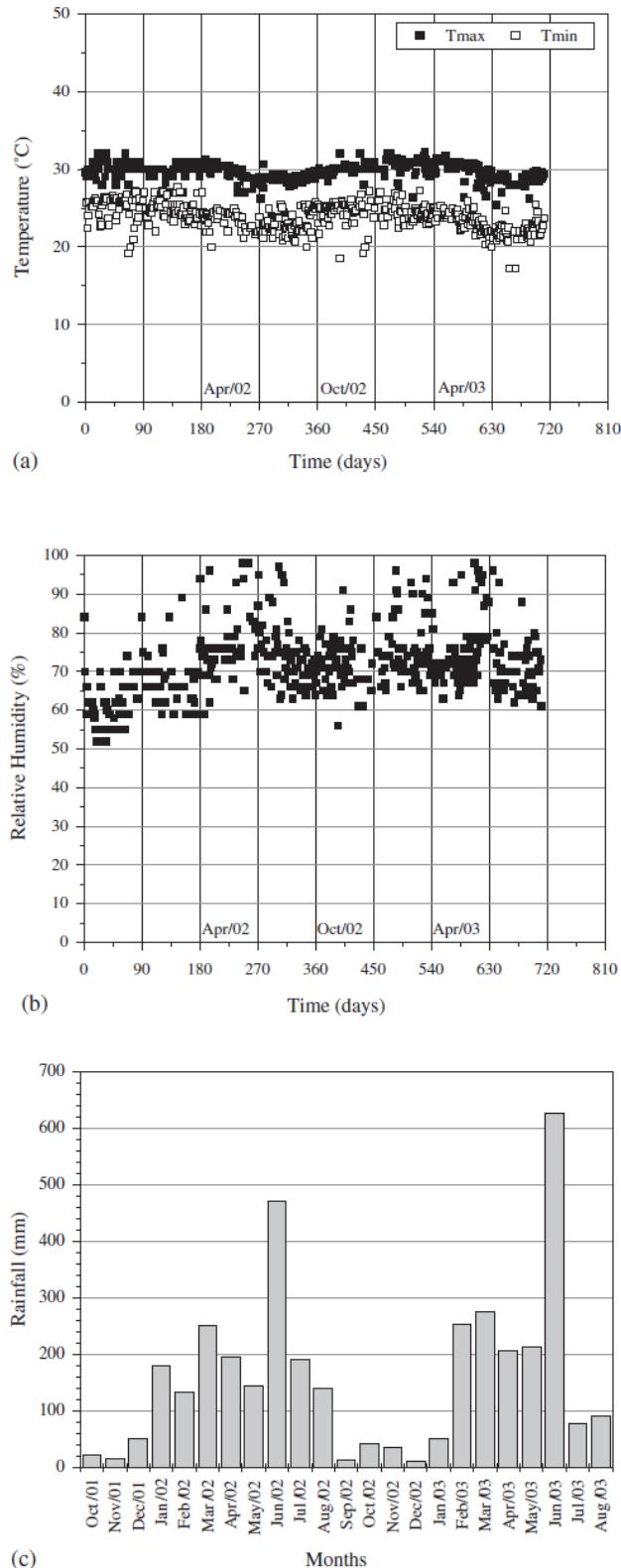


圖 2-20 現地試驗環境資料統計【2】

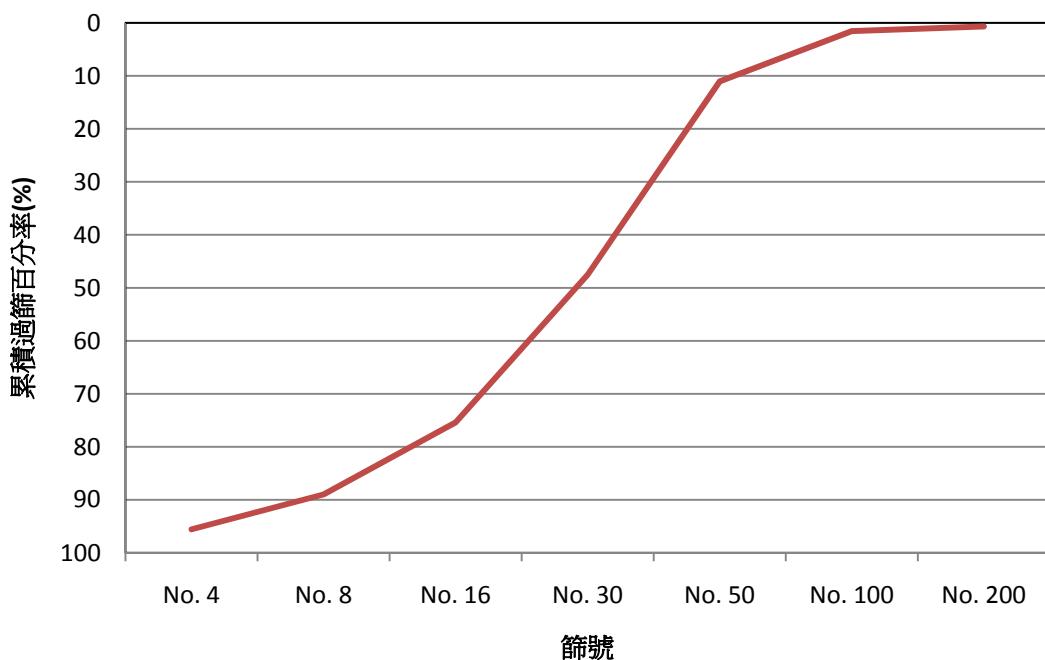


圖 3-1 細骨材篩分析曲線

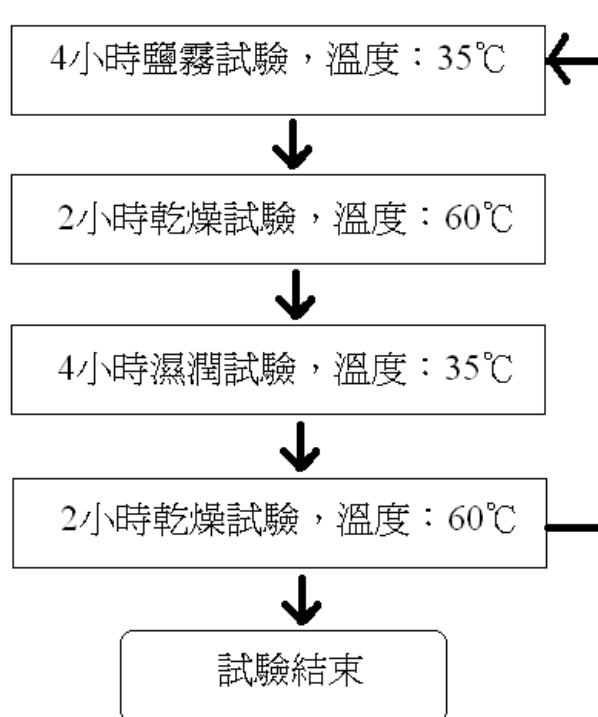


圖 3-2 鹽霧室設定循環

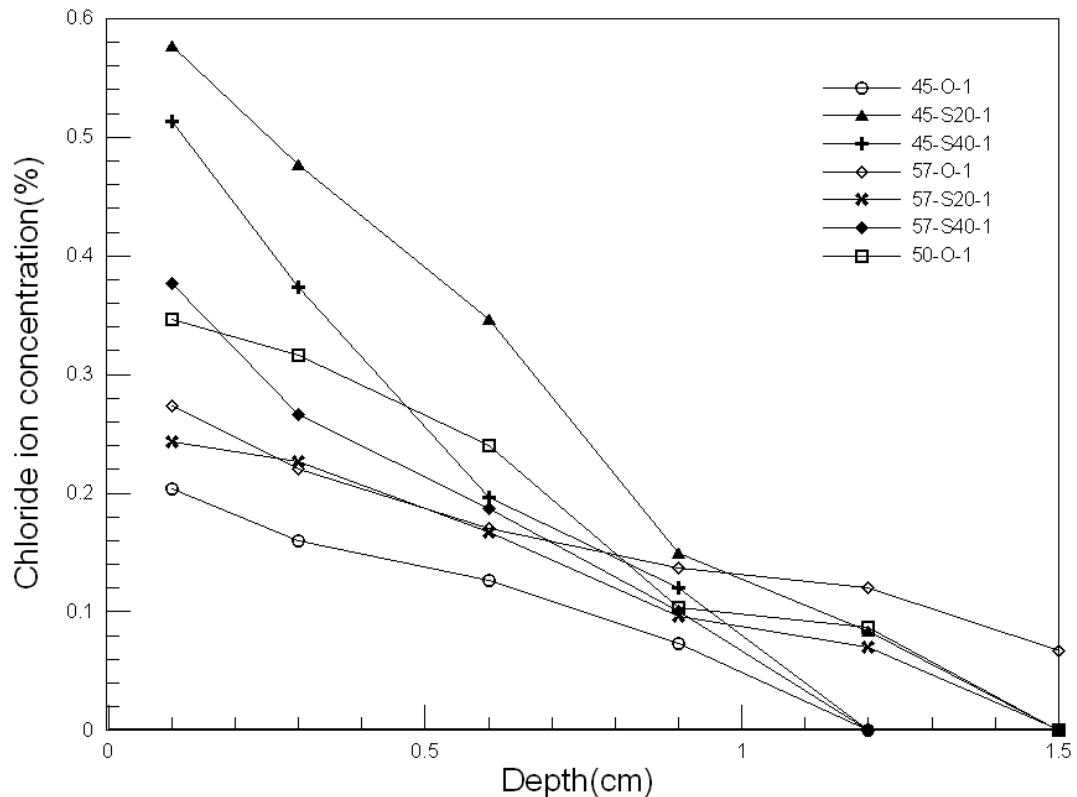


圖 4-1 氯離子含量與深度之關係比較圖 (NEW-1)

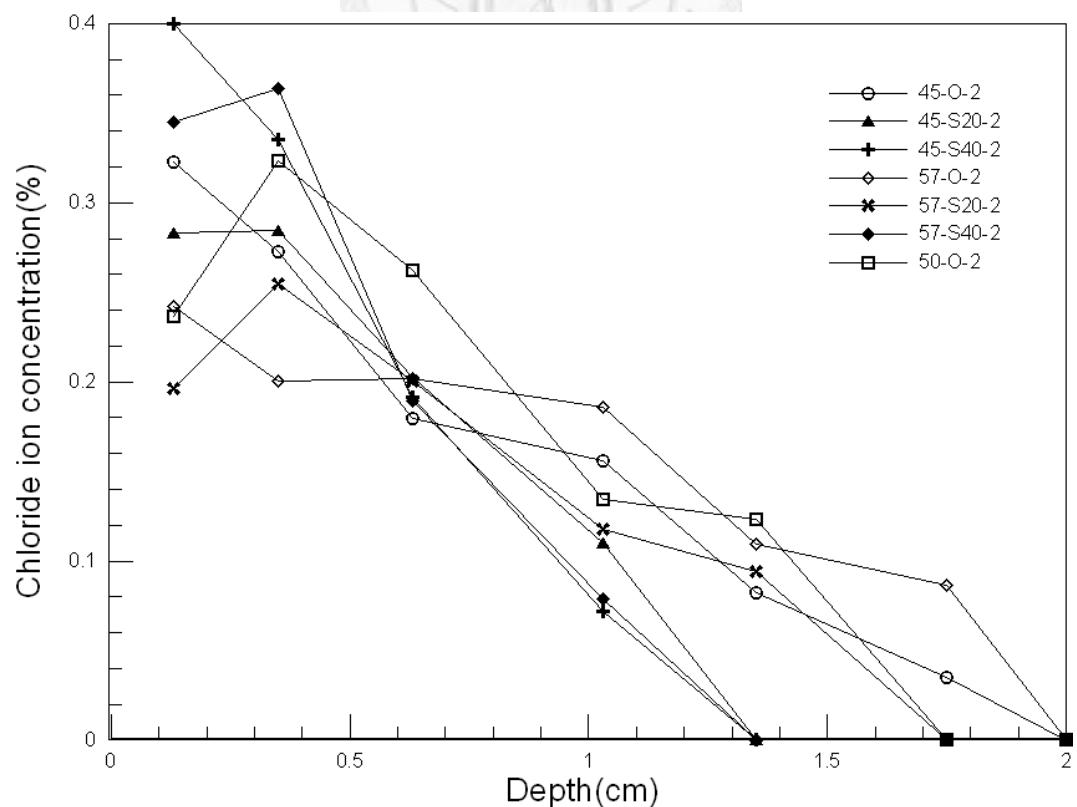


圖 4-2 氯離子含量與深度之關係比較圖 (NEW-2)

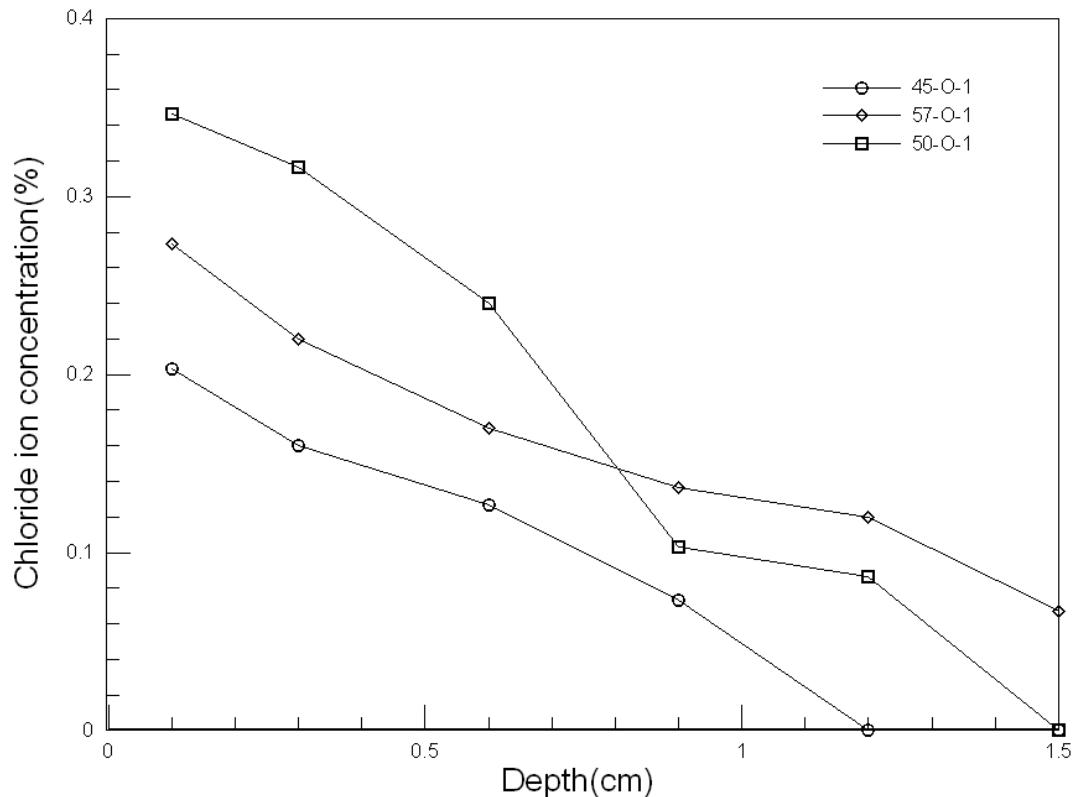


圖 4-3 不同水灰比的氯離子濃度關係 (NEW-1)

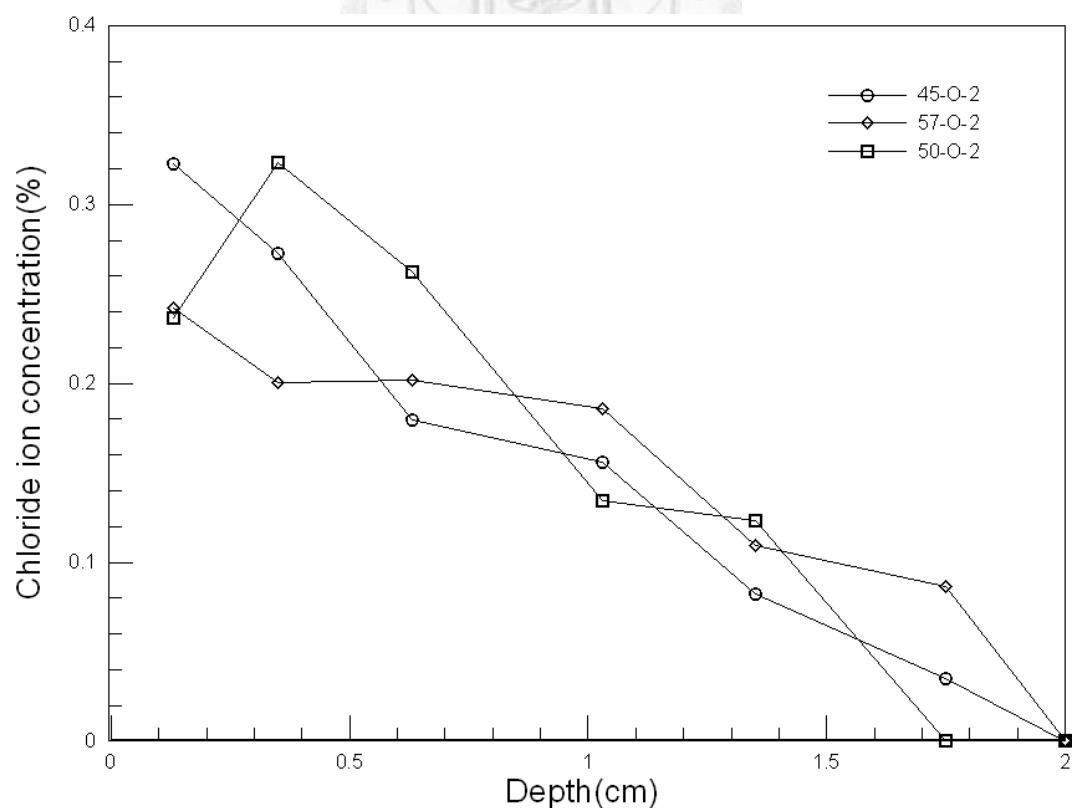


圖 4-4 不同水灰比的氯離子濃度關係 (NEW-2)

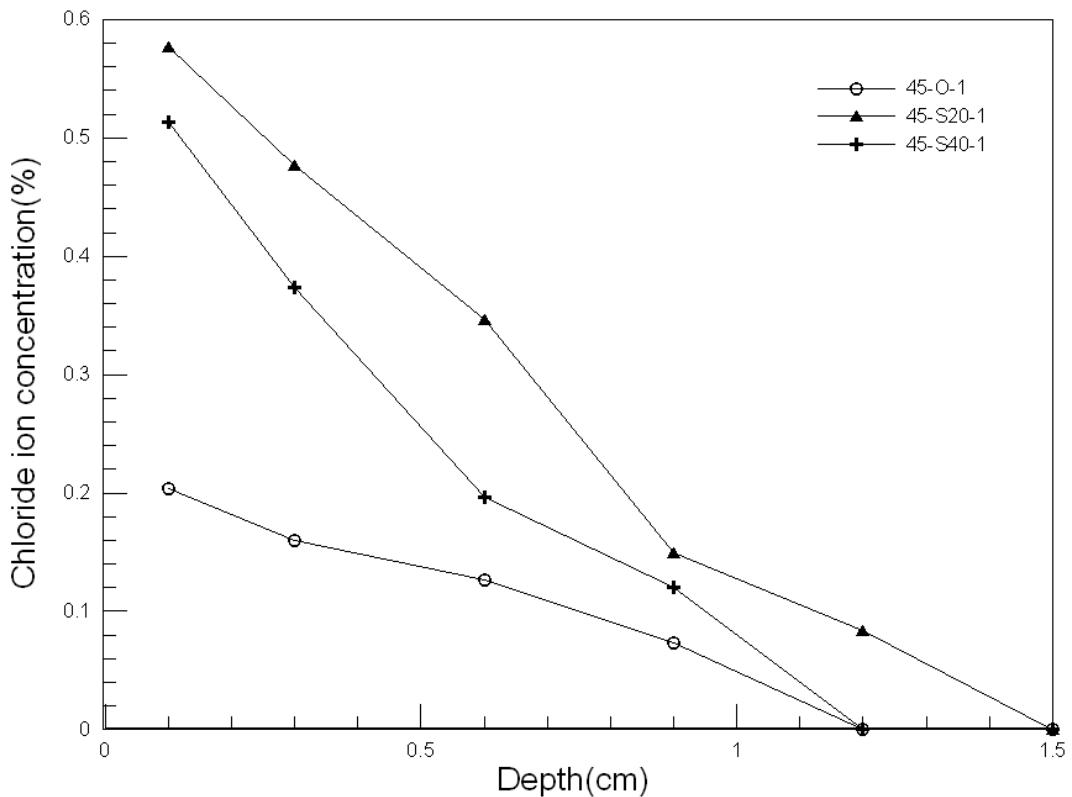


圖 4-5 爐石取代水泥量與氯離子濃度關係 (45-1)

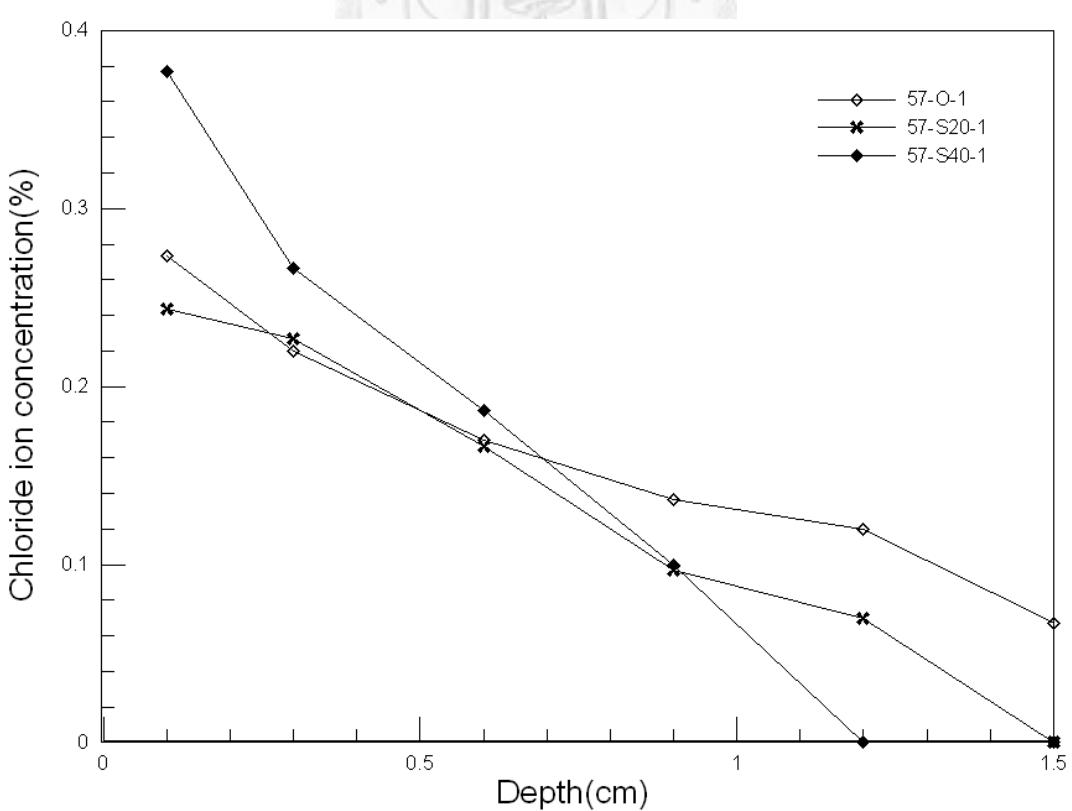


圖 4-6 爐石取代水泥量與氯離子濃度關係 (57-1)

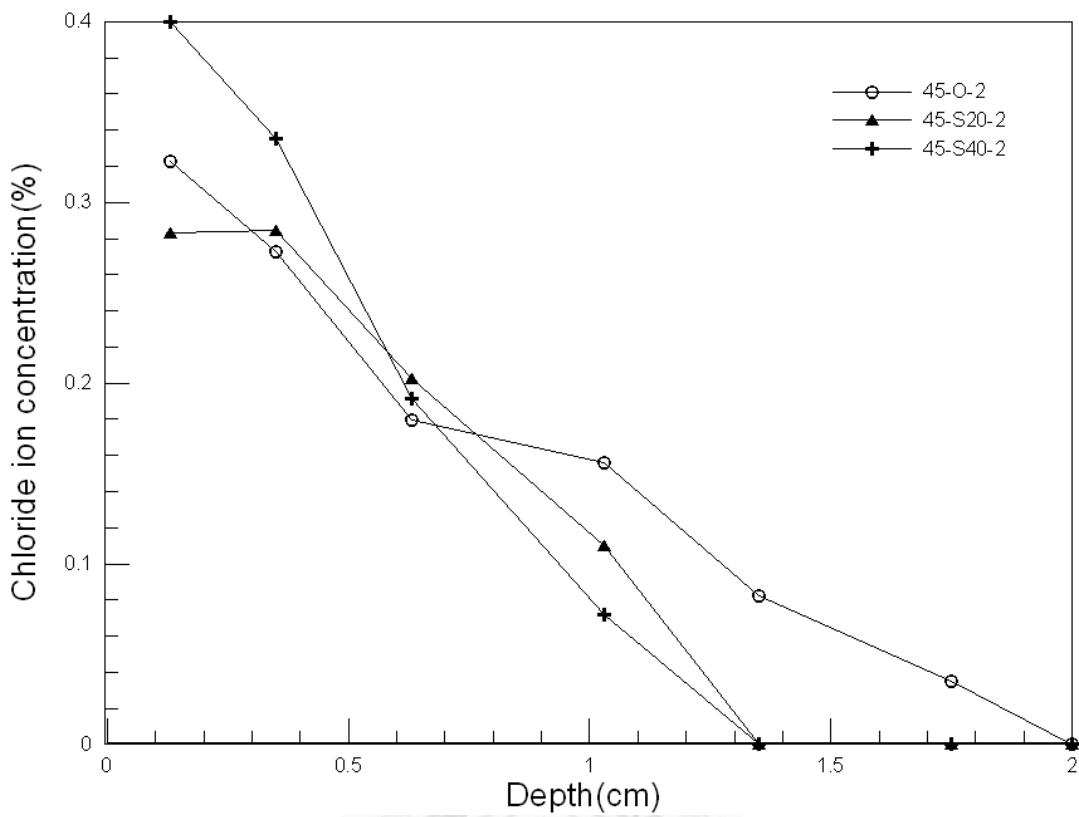


圖 4-7 爐石取代水泥量與氯離子濃度關係 (45-2)

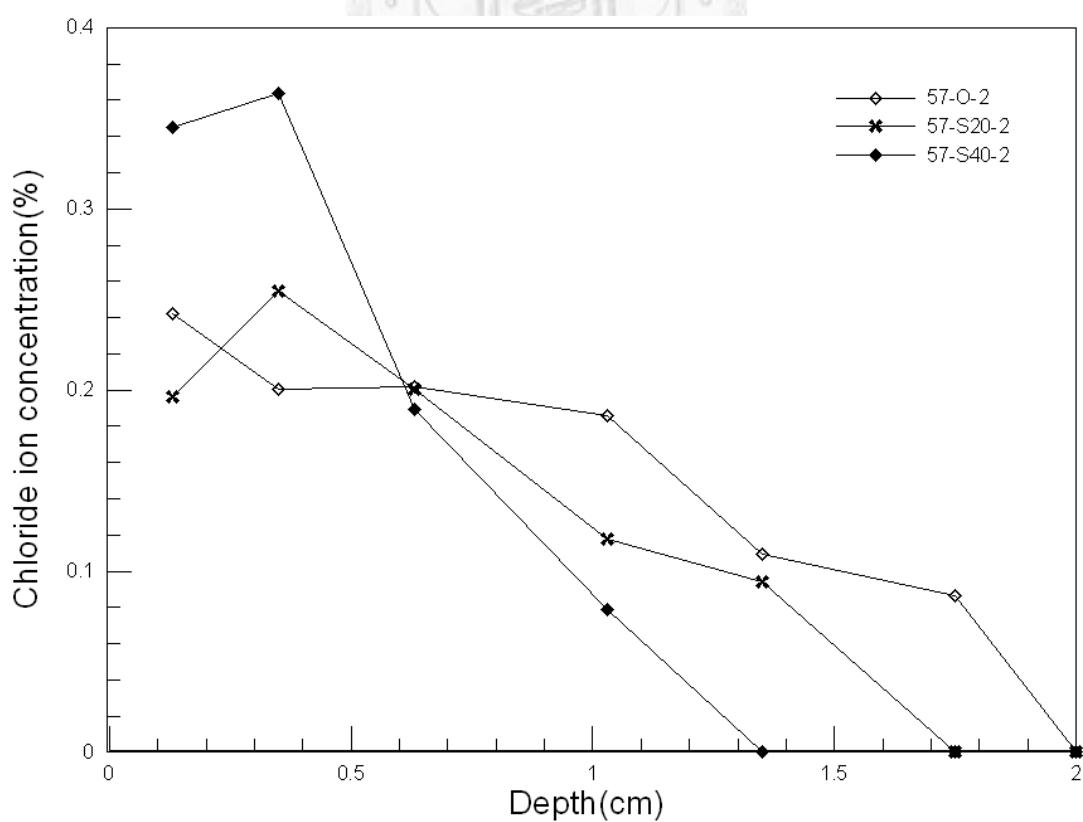


圖 4-8 爐石取代水泥量與氯離子濃度關係 (57-2)

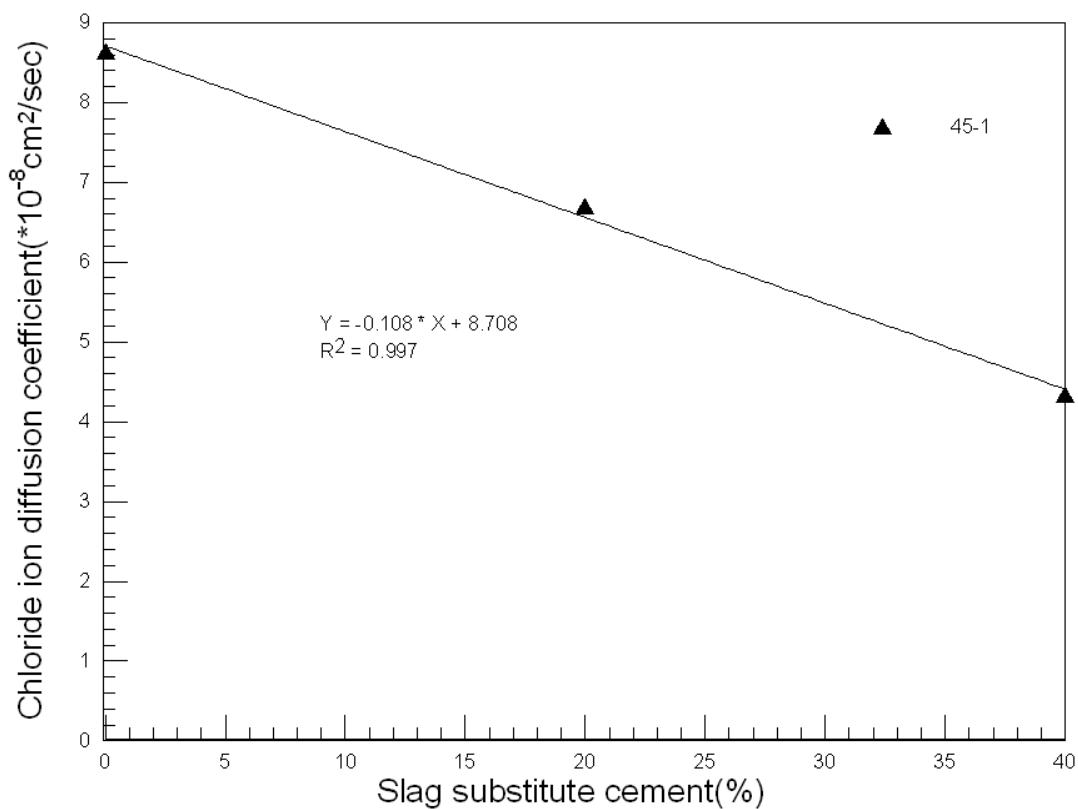


圖 4-9 爐石取代量與氯離子擴散係數關係圖 (45-1)

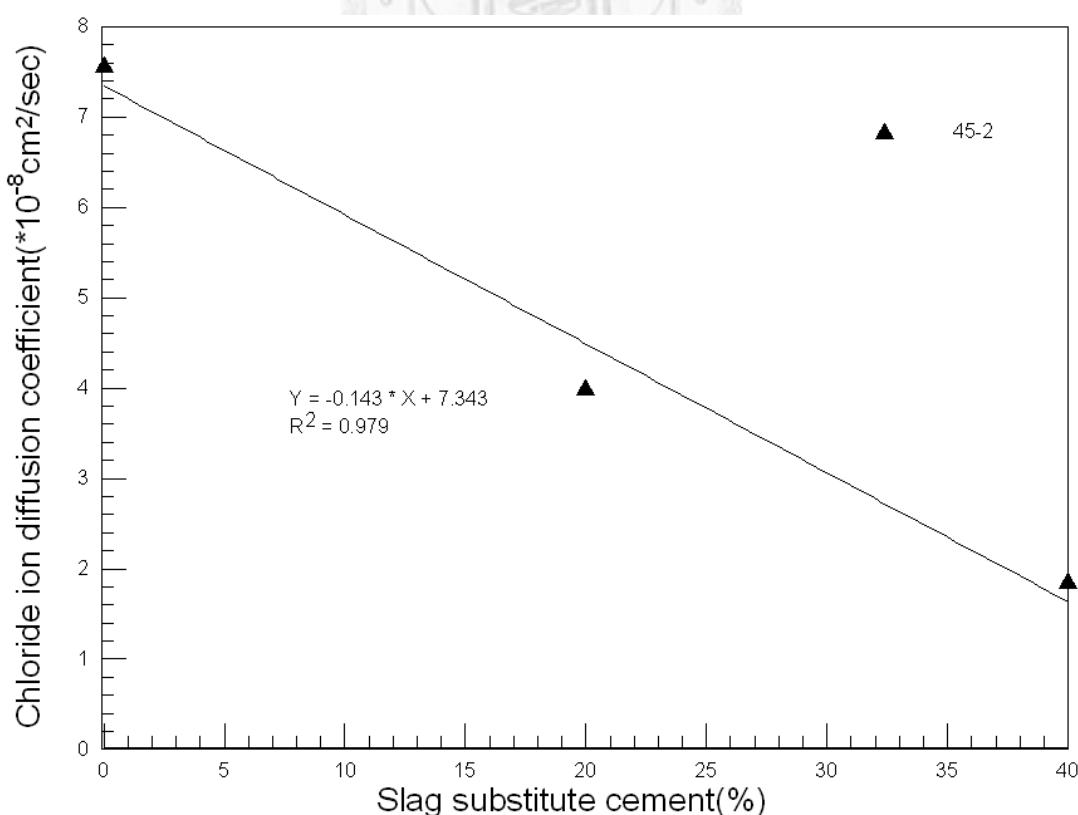


圖 4-10 爐石取代量與氯離子擴散係數關係圖 (45-2)

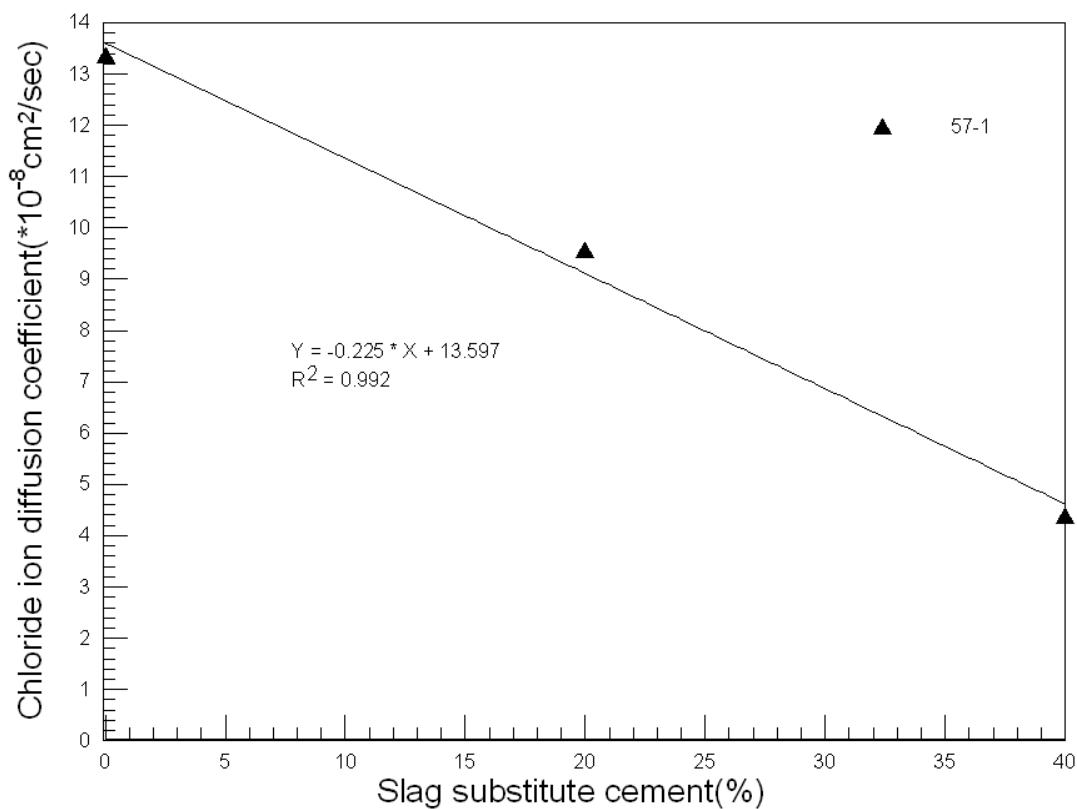


圖 4-11 爐石取代量與氯離子擴散係數關係圖 (57-1)

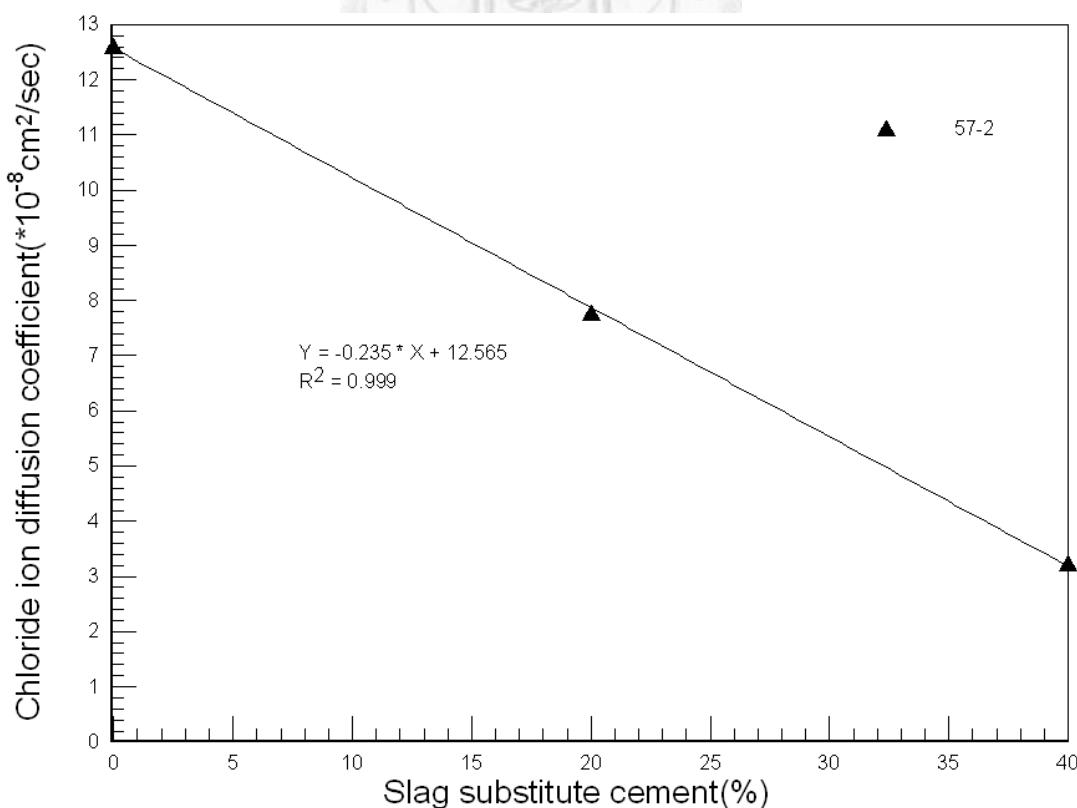


圖 4-12 爐石取代量與氯離子擴散係數關係圖 (57-2)

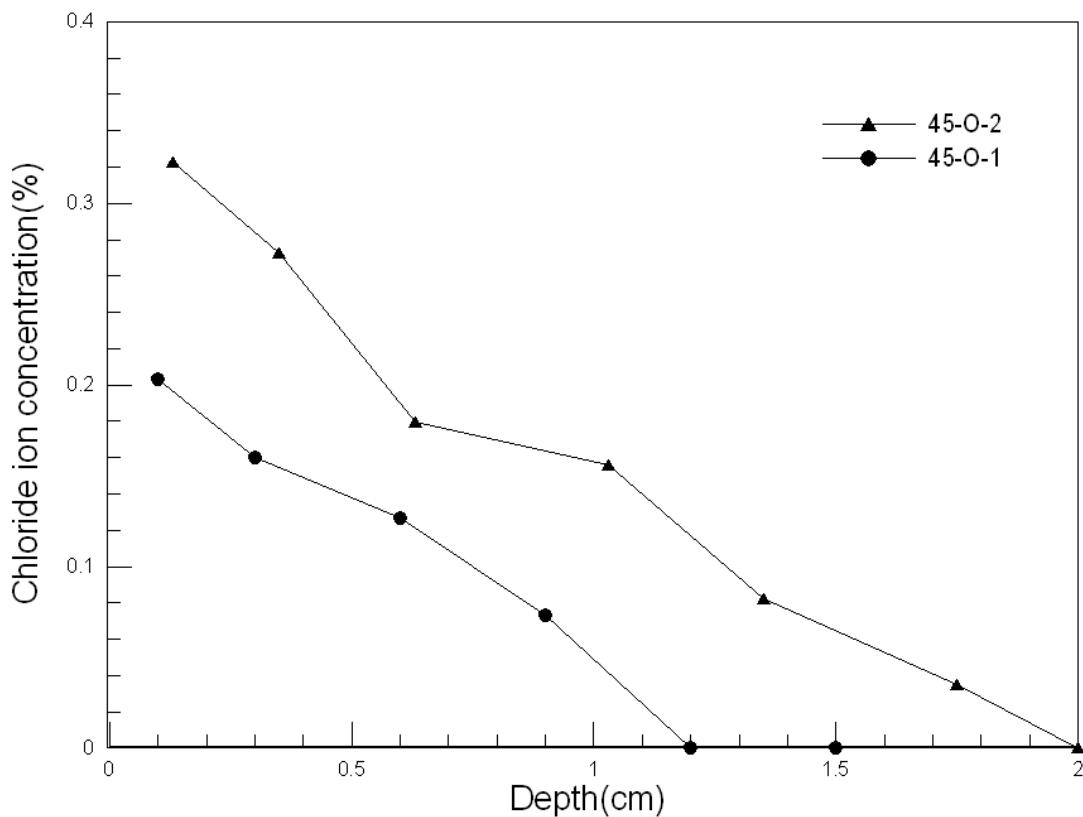


圖 4-13 齡期與氯離子濃度關係 (45-O)

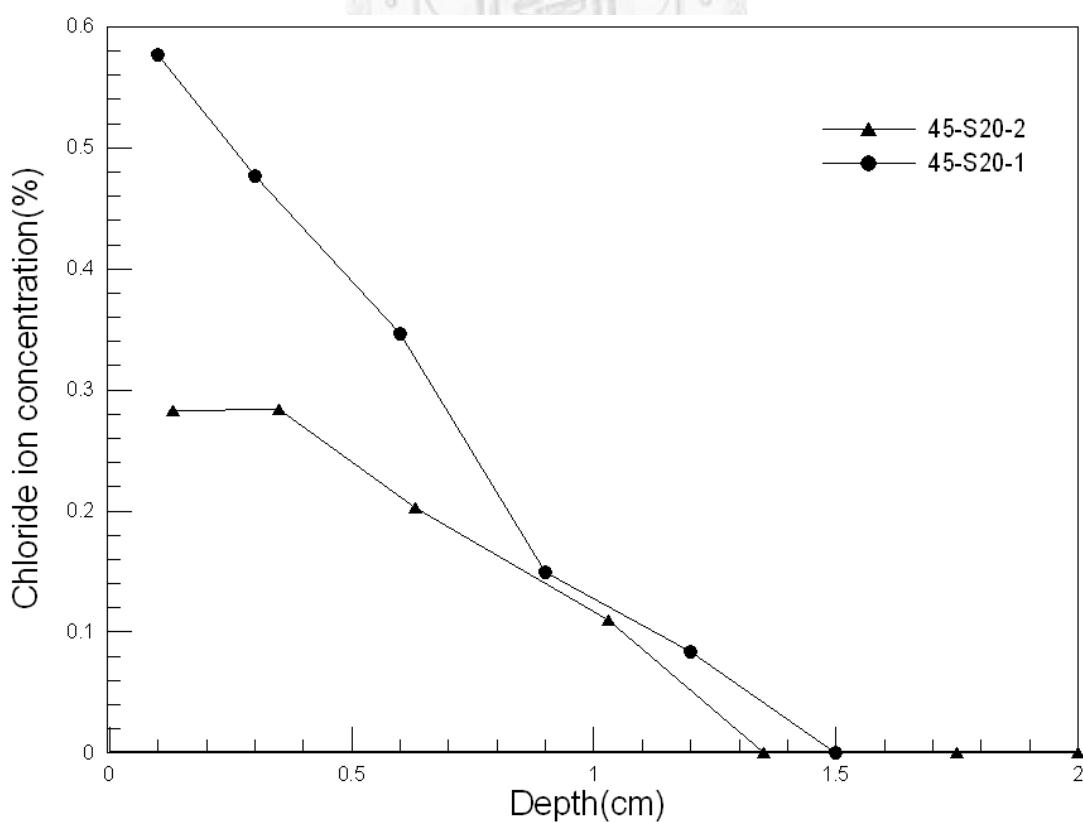


圖 4-14 齡期與氯離子濃度關係 (45-S20)

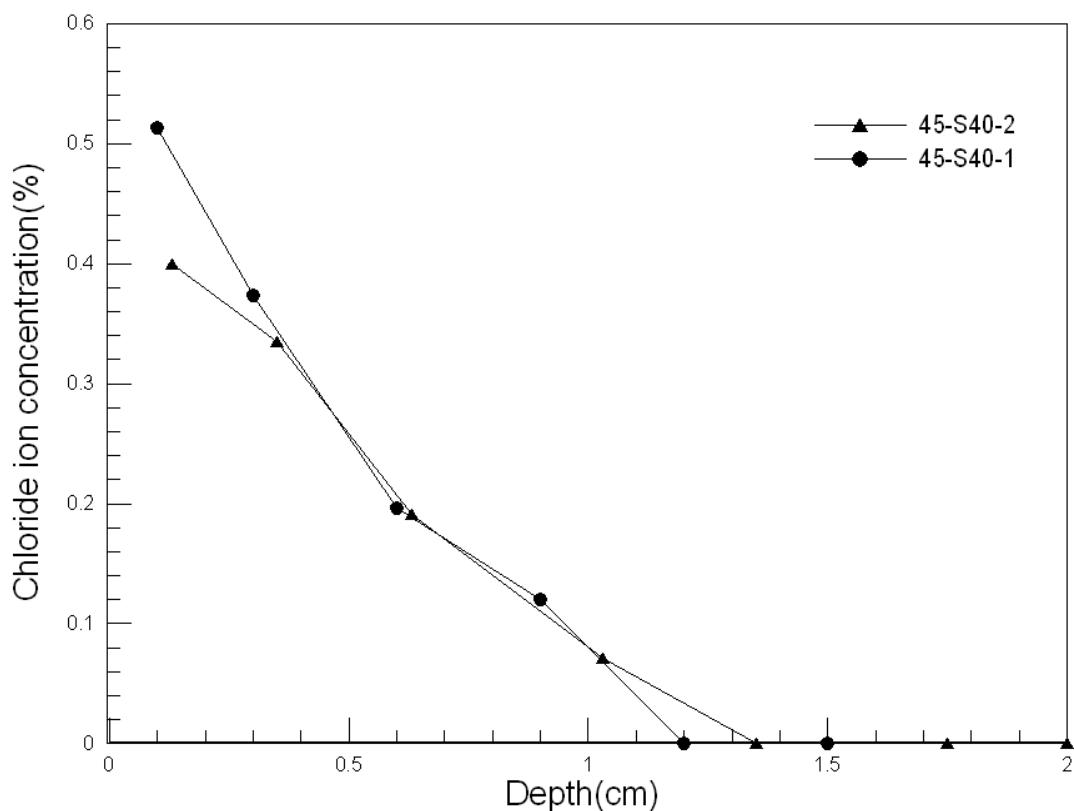


圖 4-15 齡期與氯離子濃度關係 (45-S40)

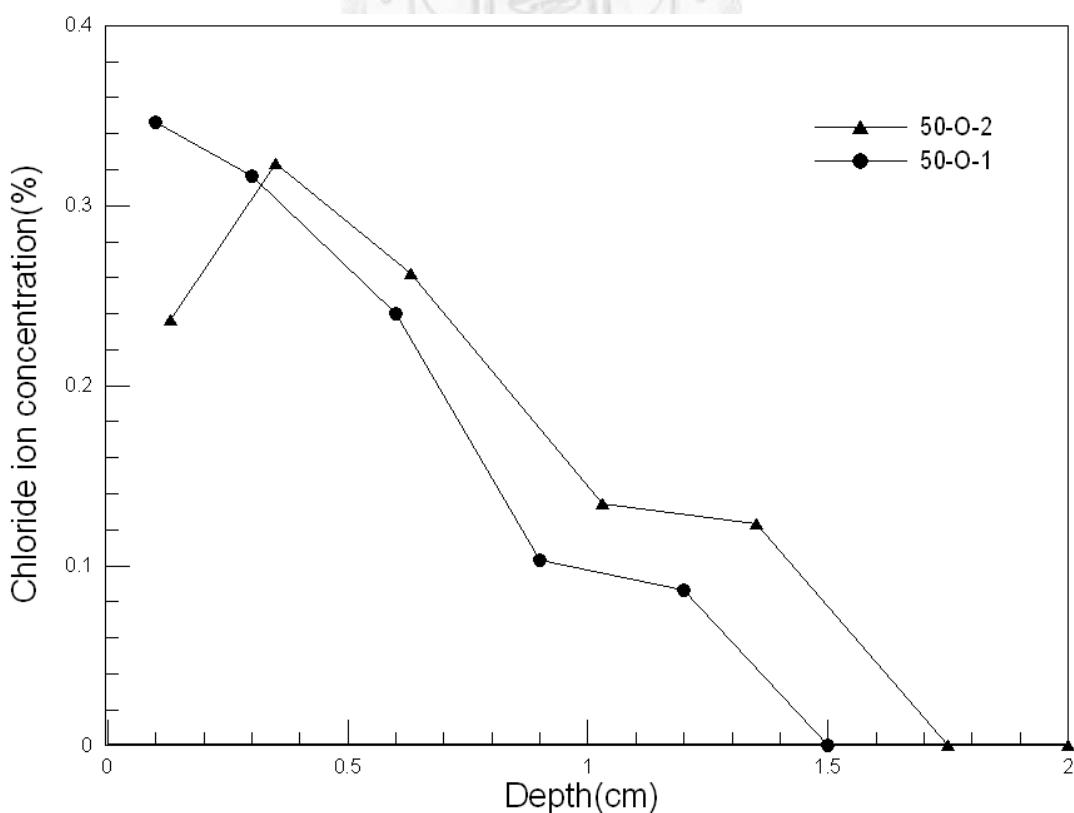


圖 4-16 齡期與氯離子濃度關係 (50-O)

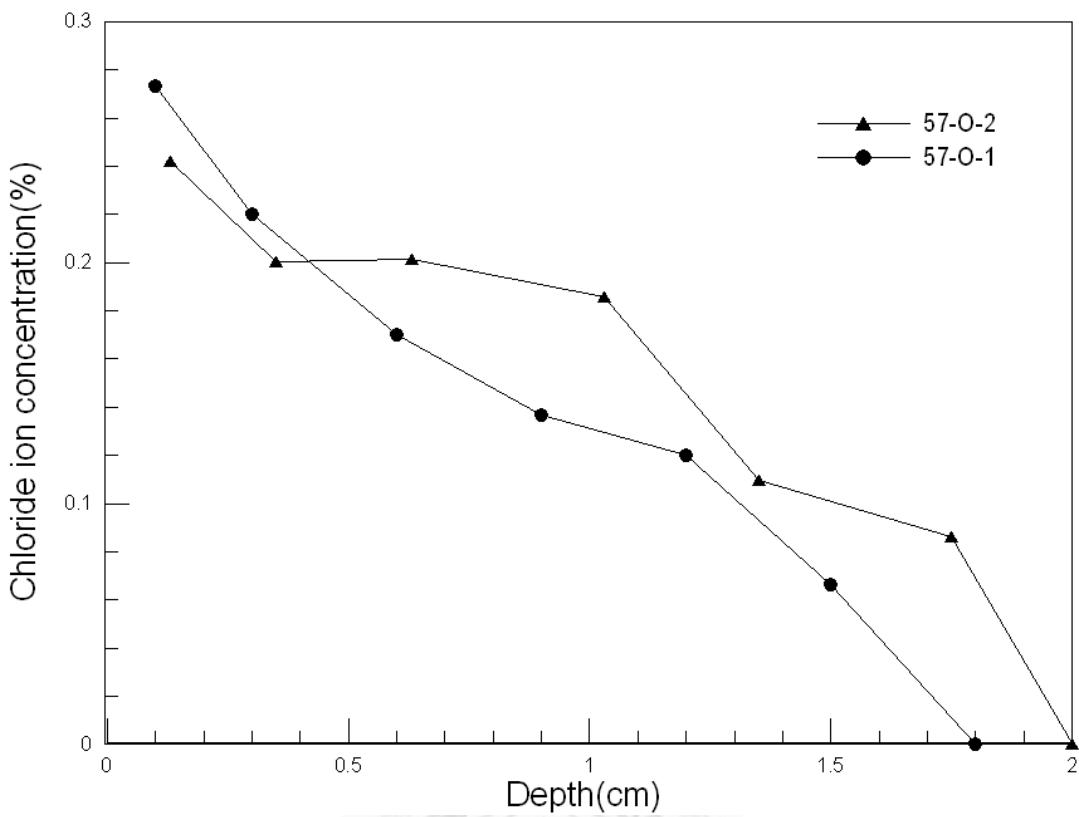


圖 4-17 齡期與氯離子濃度關係 (57-O)

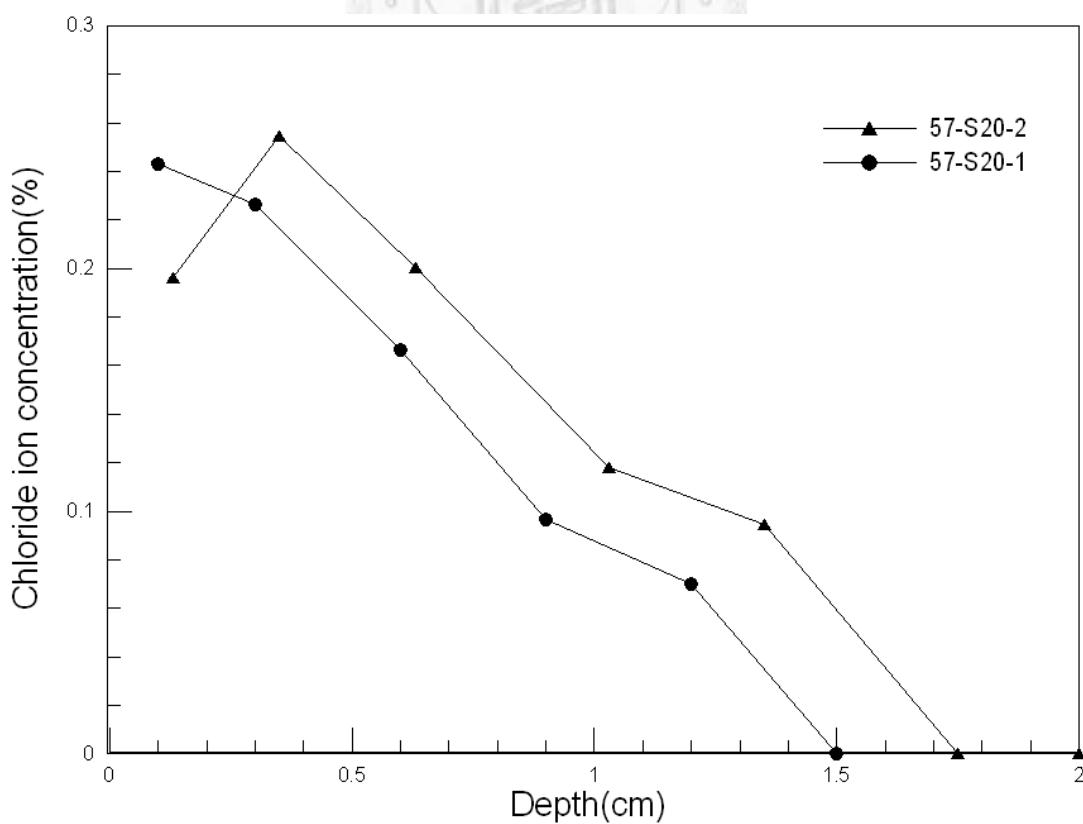


圖 4-18 齡期與氯離子濃度關係 (57-S20)

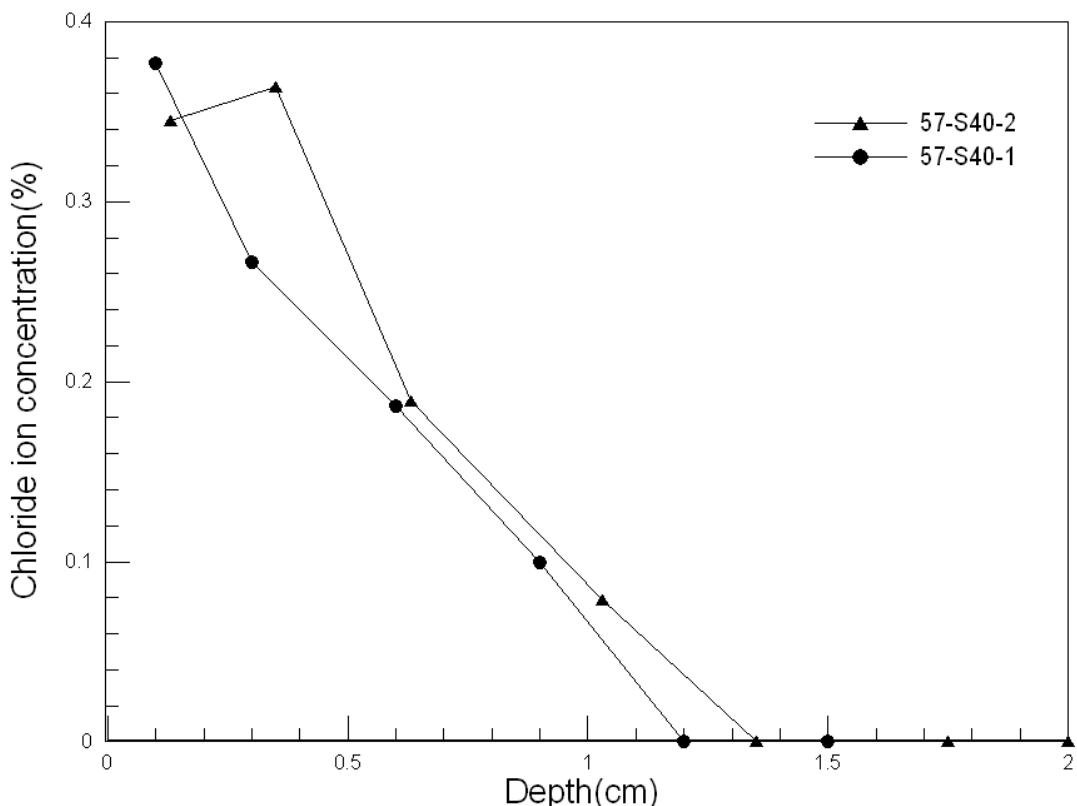


圖 4-19 齡期與氯離子濃度關係 (57-S40)

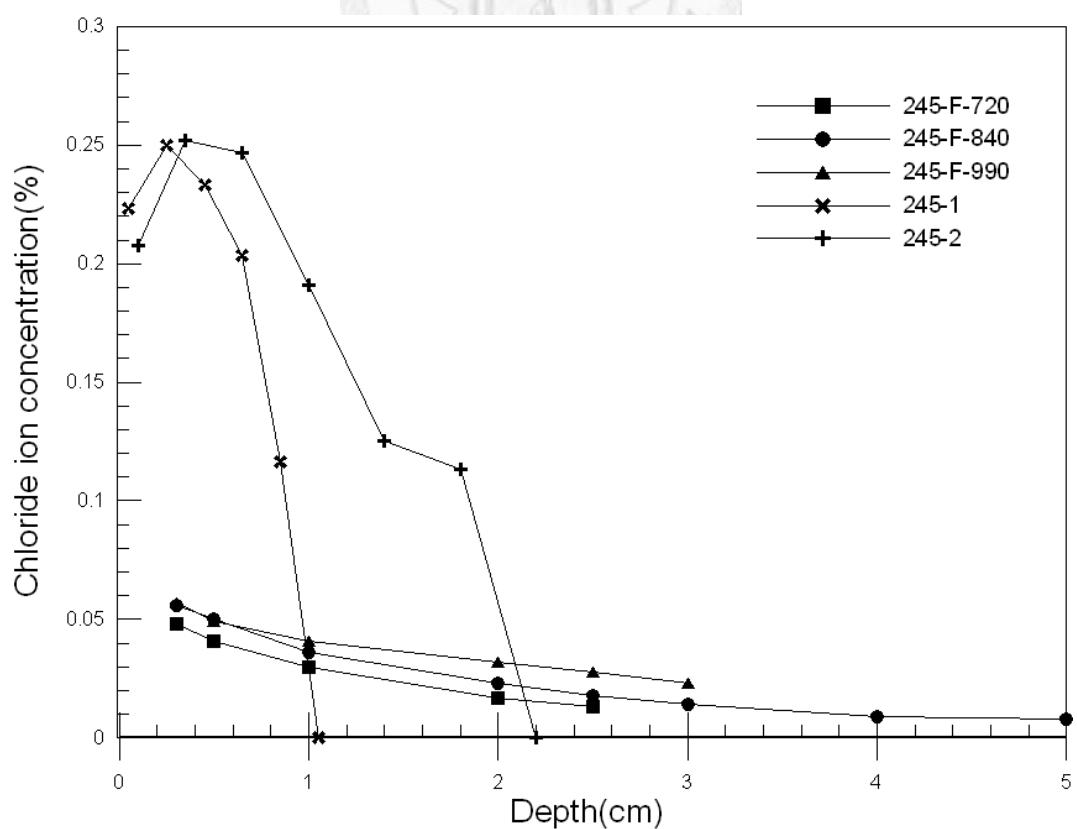


圖 4-20 245 組各齡期氯離子含量比較

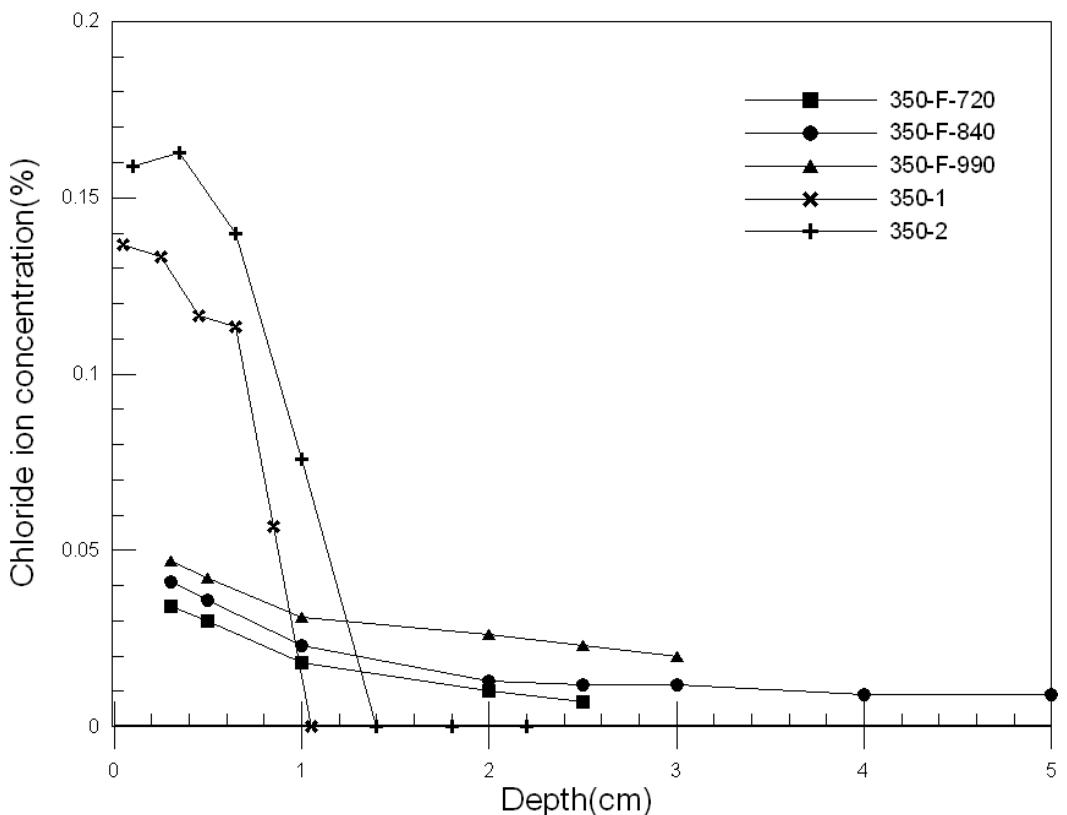


圖 4-21 350 組各齡期氯離子含量比較

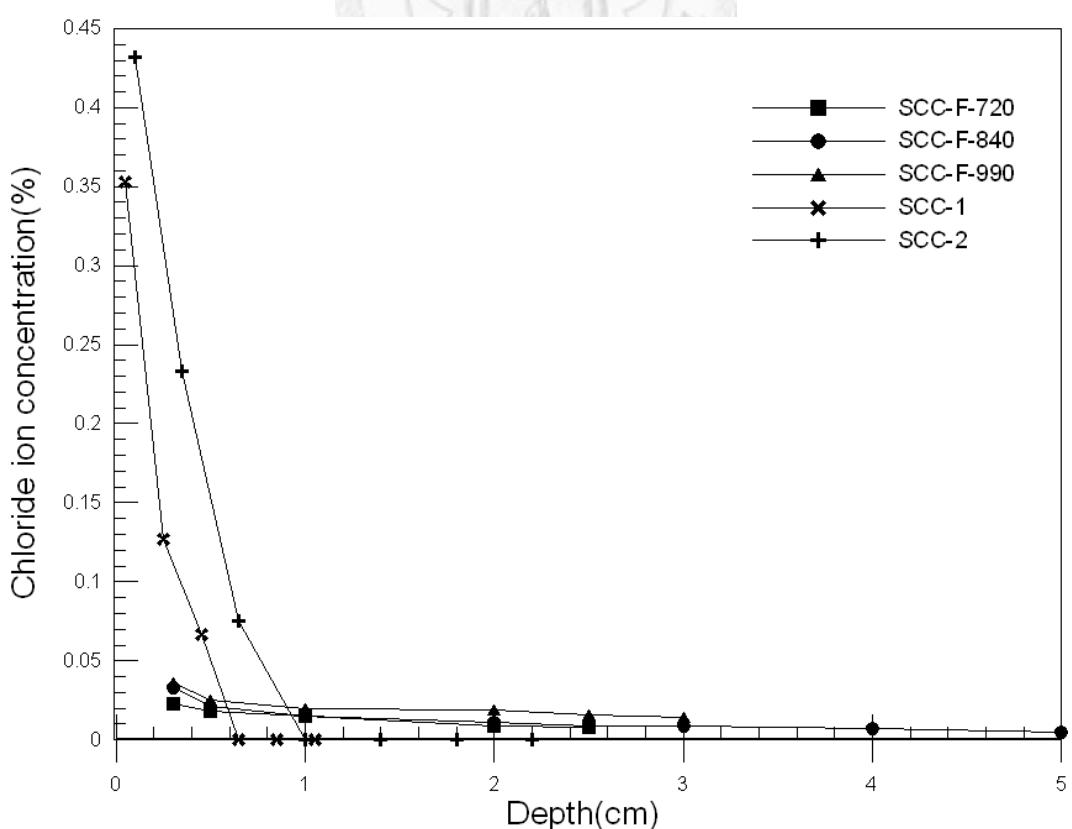


圖 4-22 SCC 組各齡期氯離子含量比較

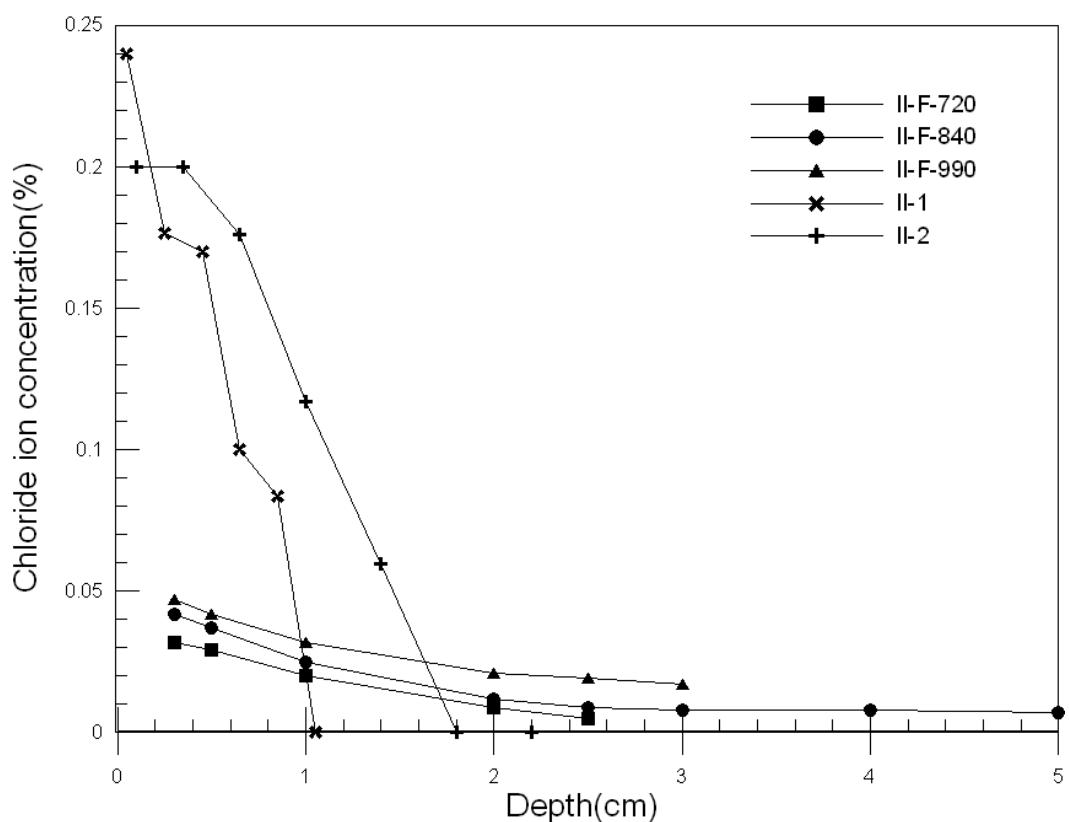


圖 4-23 II 組各齡期氯離子含量比較

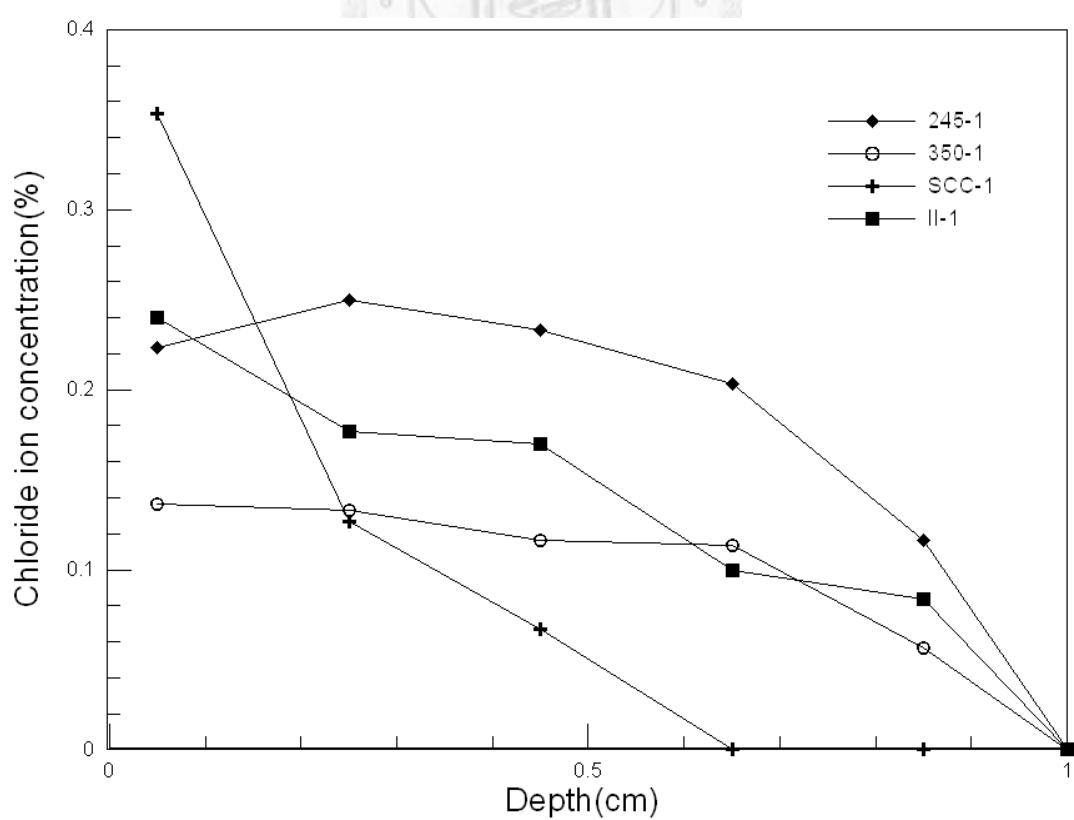


圖 4-24 氯離子含量與深度之關係比較圖 (DGH-1)

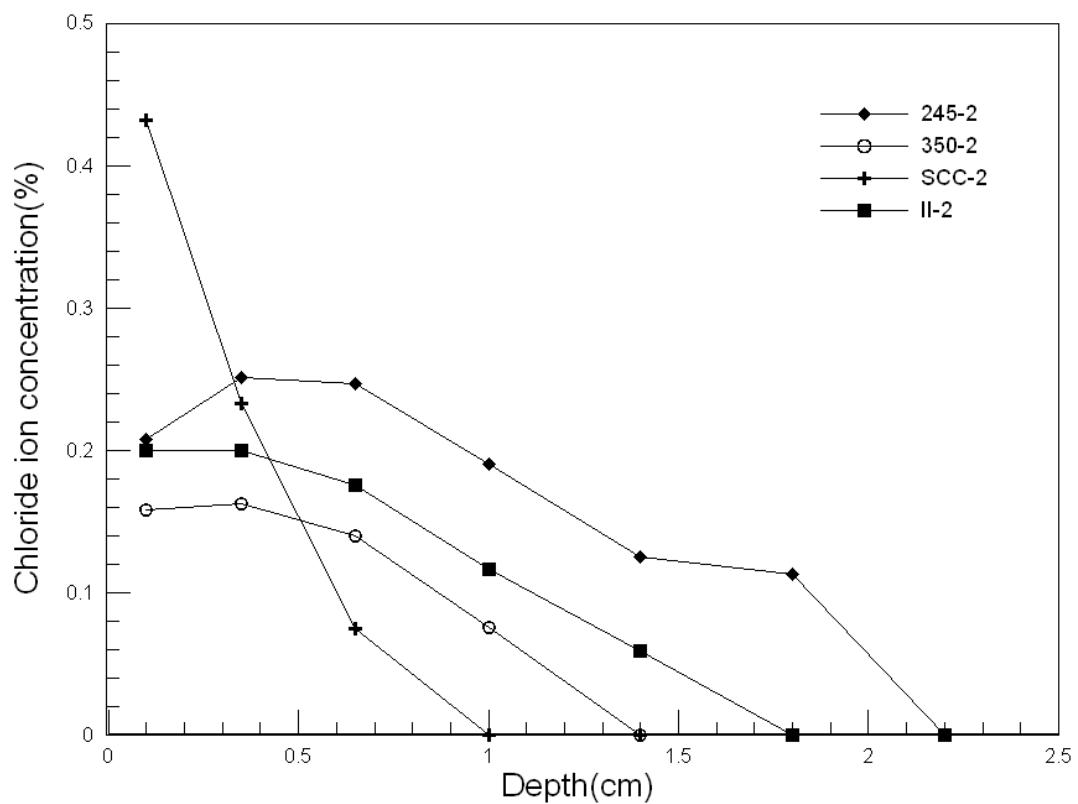


圖 4-25 氯離子含量與深度之關係比較圖 (DGH-2)

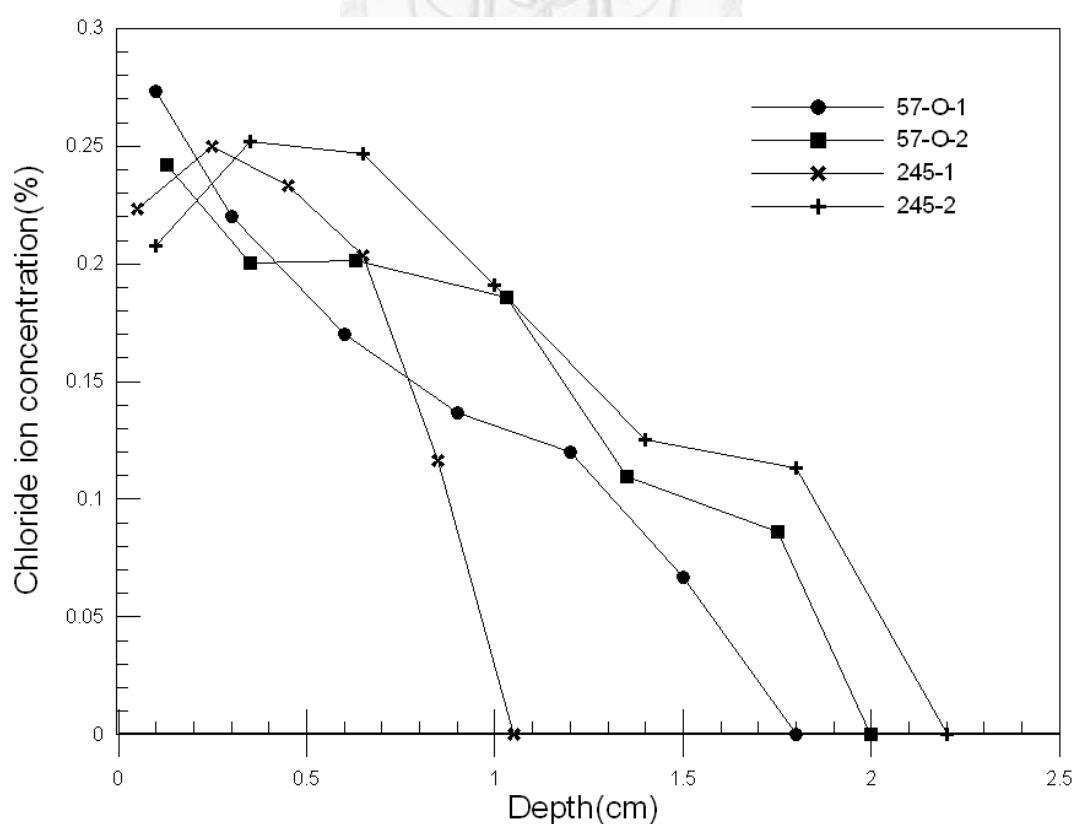


圖 4-26 現地與加速試驗比較圖 (245 組)

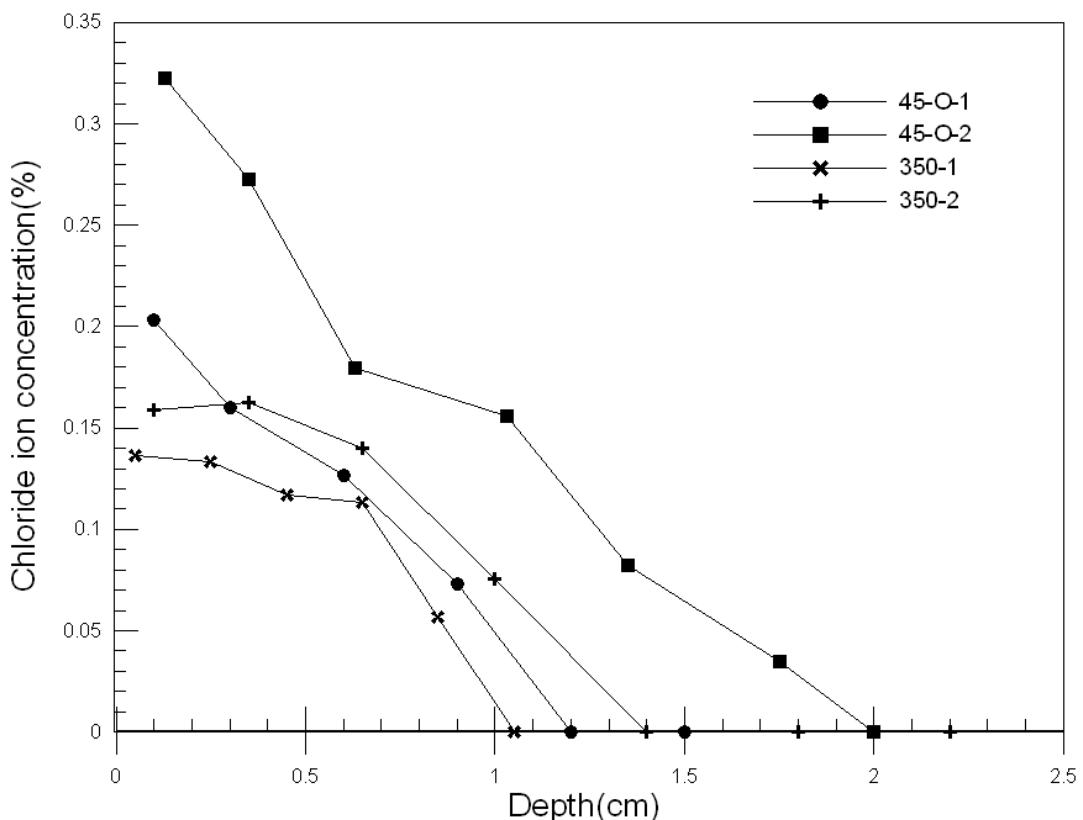


圖 4-27 現地與加速試驗比較圖（350 組）

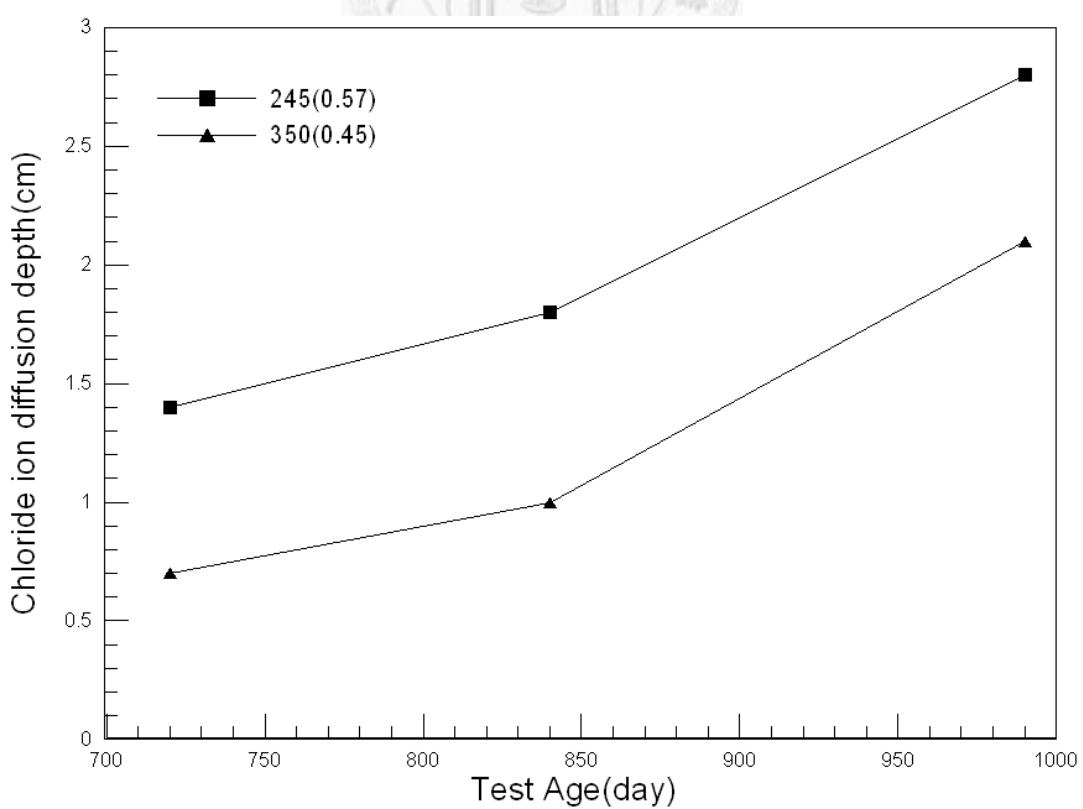


圖 4-28 現地試驗氯離子滲入深度與試驗齡期之關係

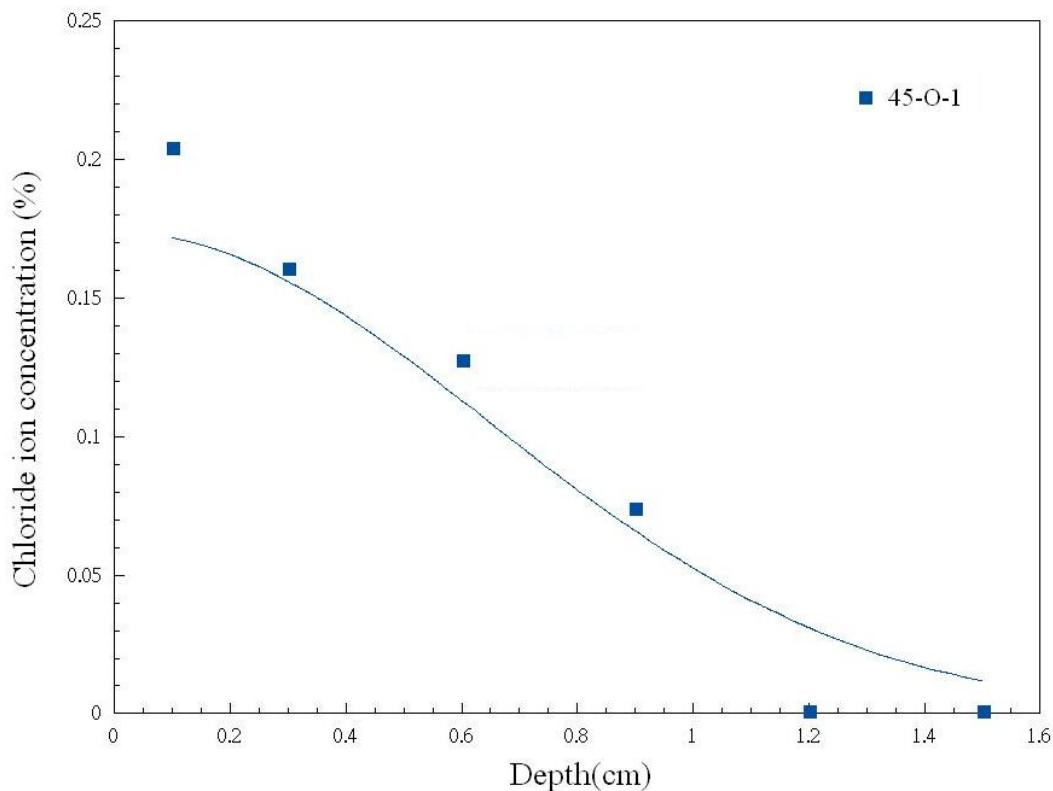


圖 4-29 編號 45-O-1 氯離子含量與深度之關係圖

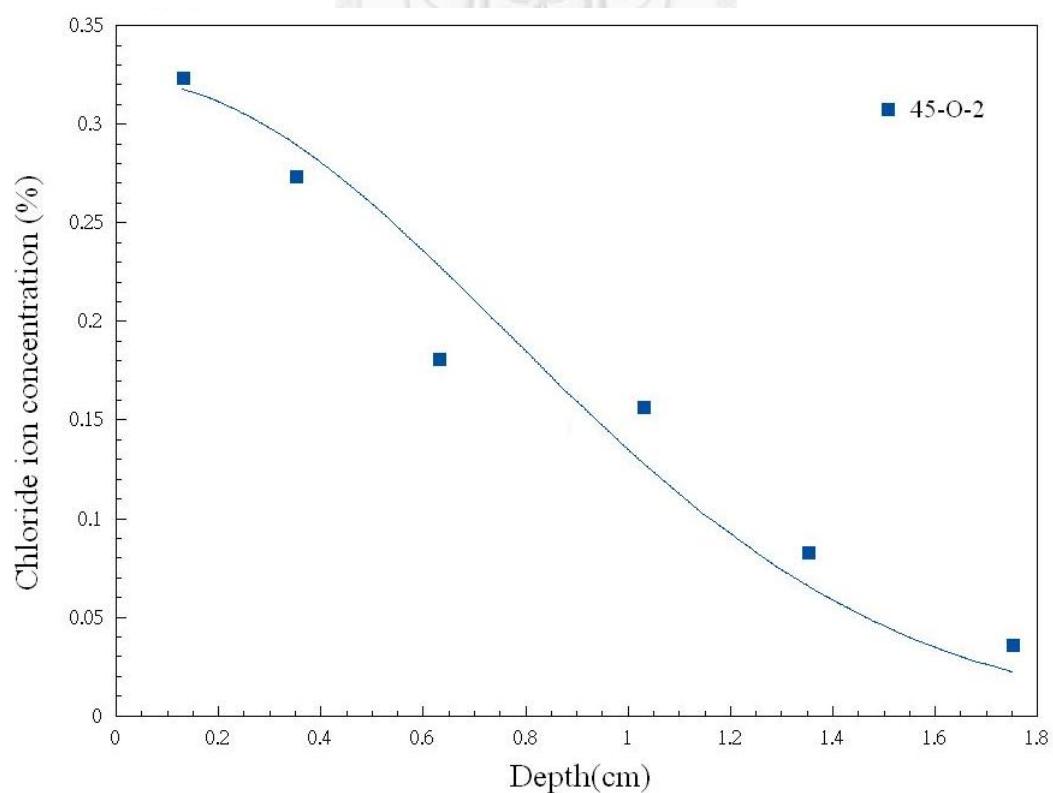


圖 4-30 編號 45-O-2 氯離子含量與深度之關係圖

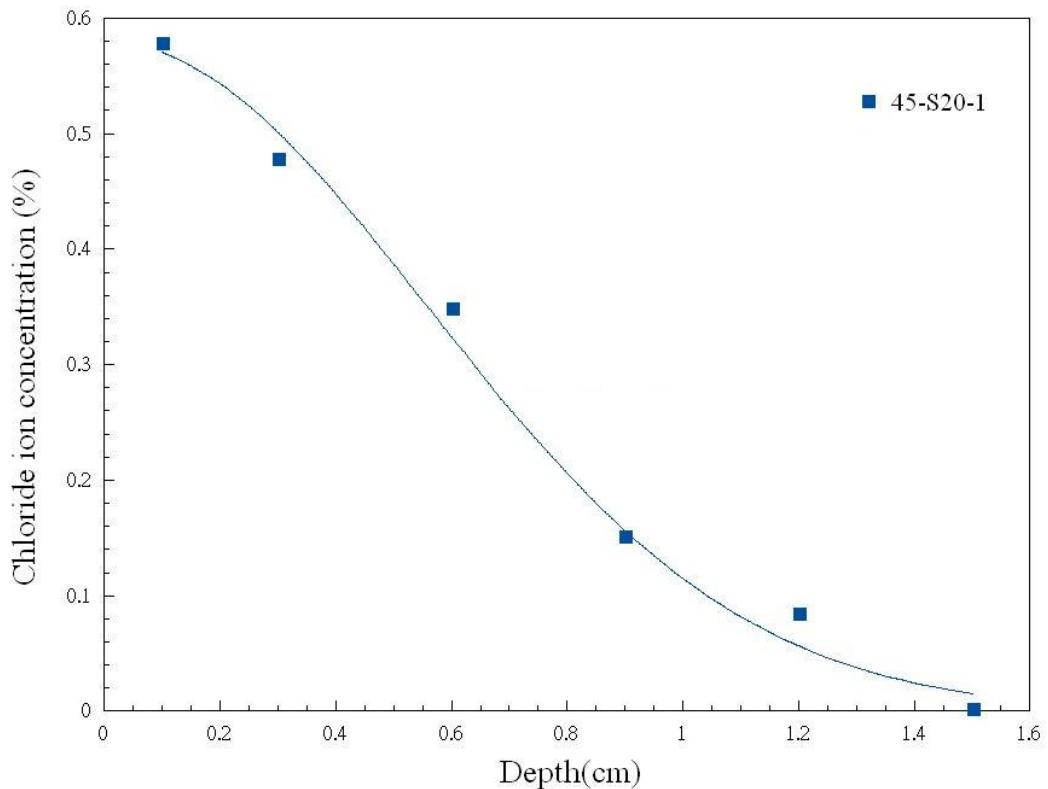


圖 4-31 編號 45-S20-1 氯離子含量與深度之關係圖

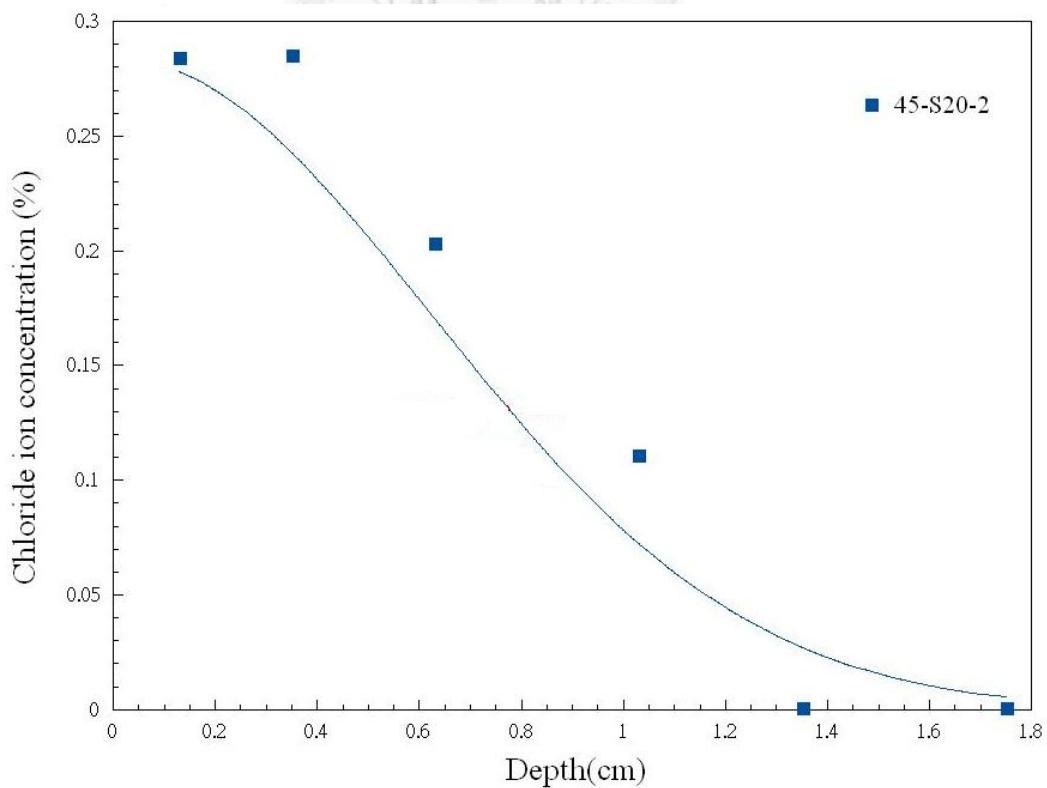


圖 4-32 編號 45-S20-2 氯離子含量與深度之關係圖

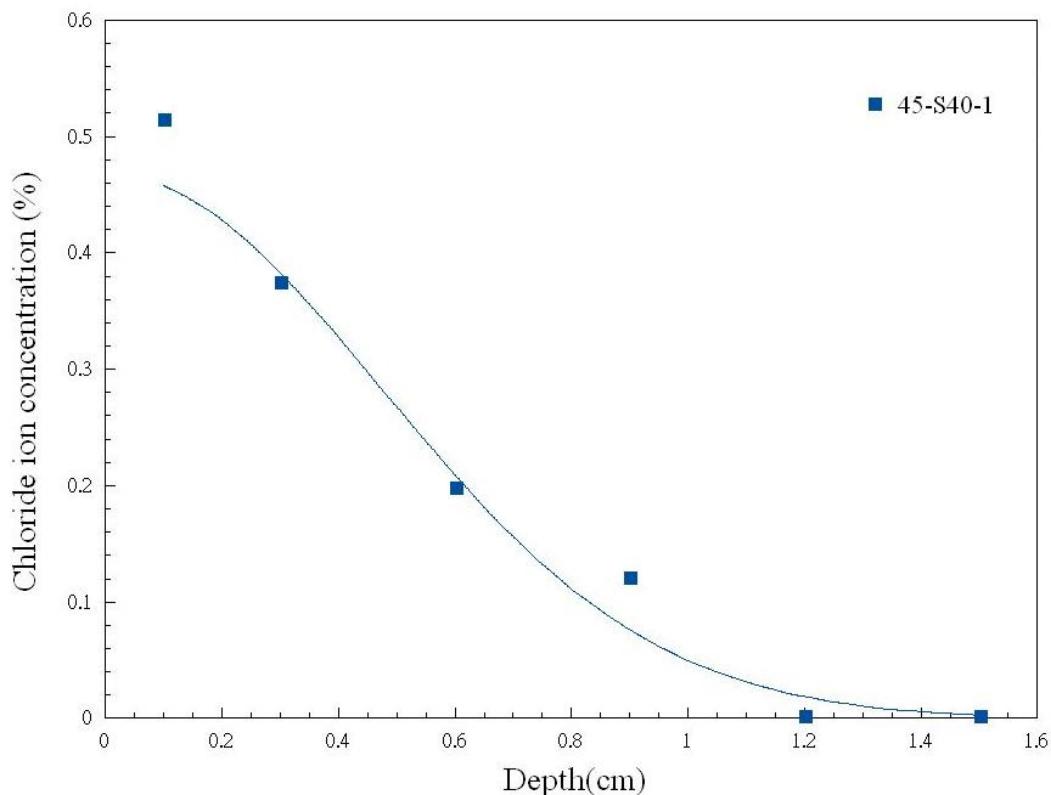


圖 4-33 編號 45-S40-1 氯離子含量與深度之關係圖

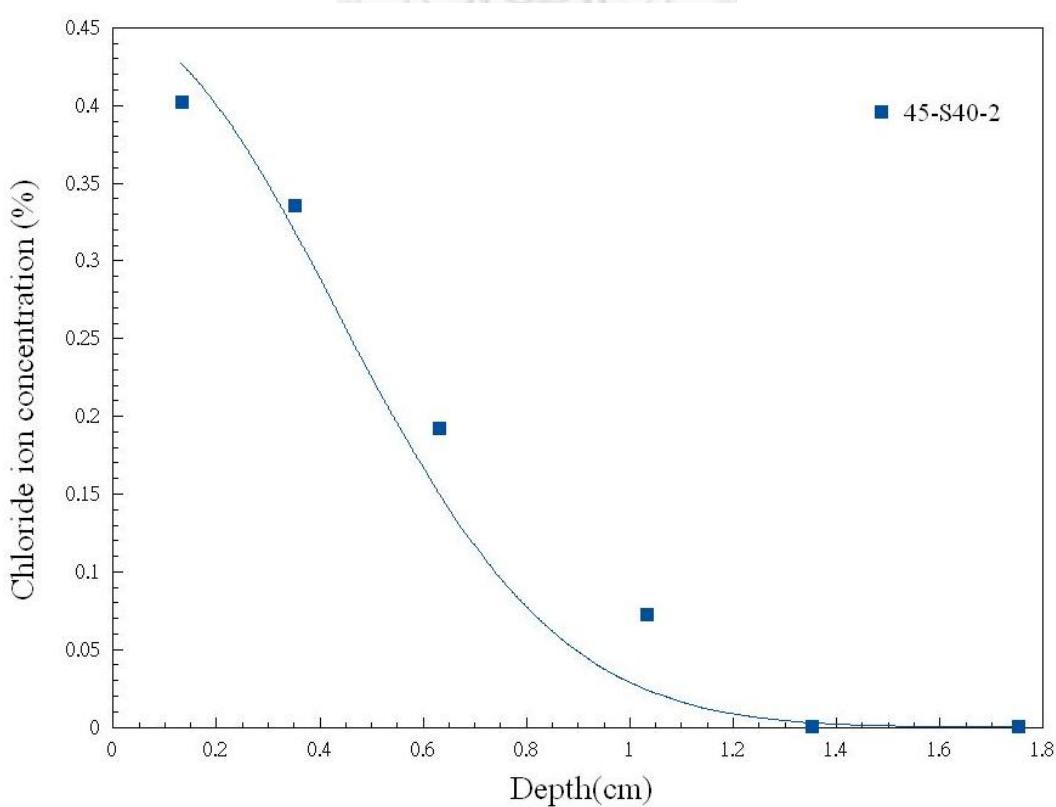


圖 4-34 編號 45-S40-2 氯離子含量與深度之關係圖

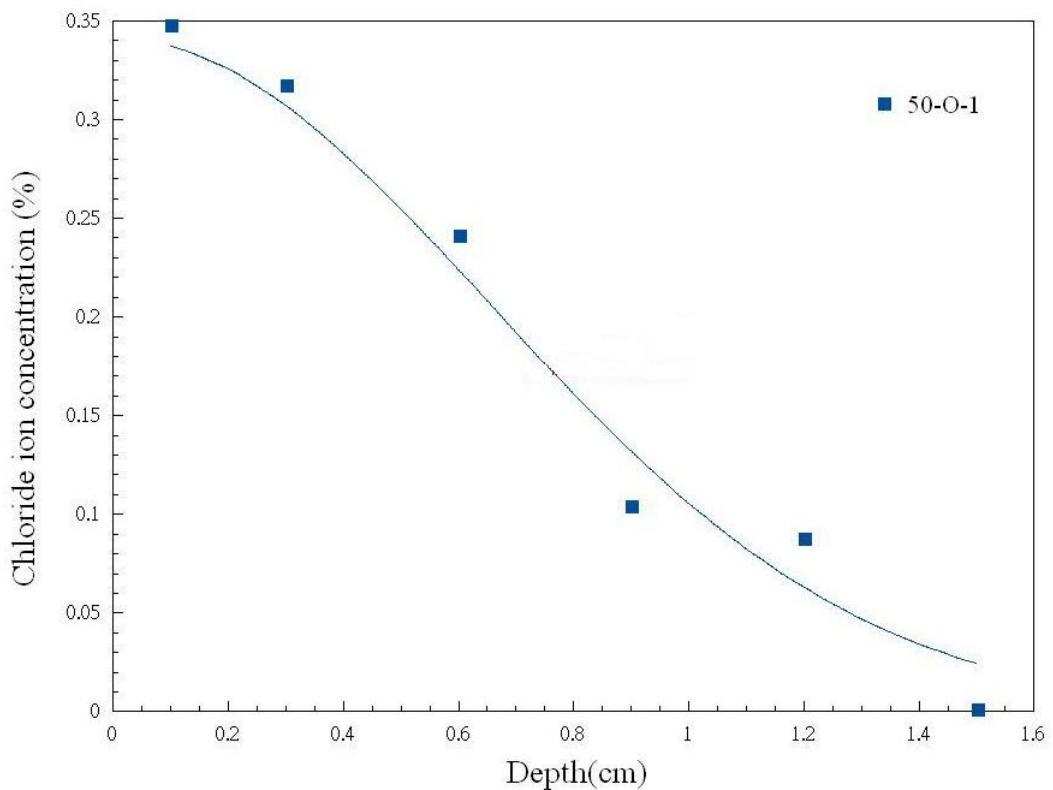


圖 4-35 編號 50-O-1 氯離子含量與深度之關係圖

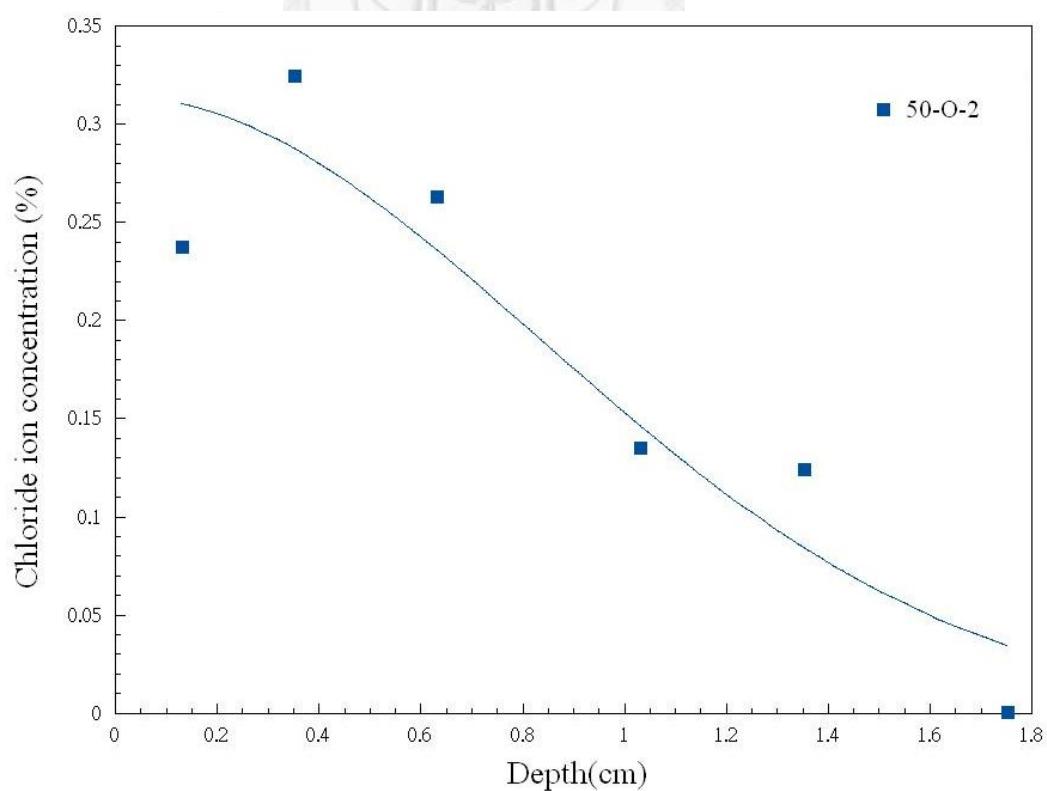


圖 4-36 編號 50-O-2 氯離子含量與深度之關係圖

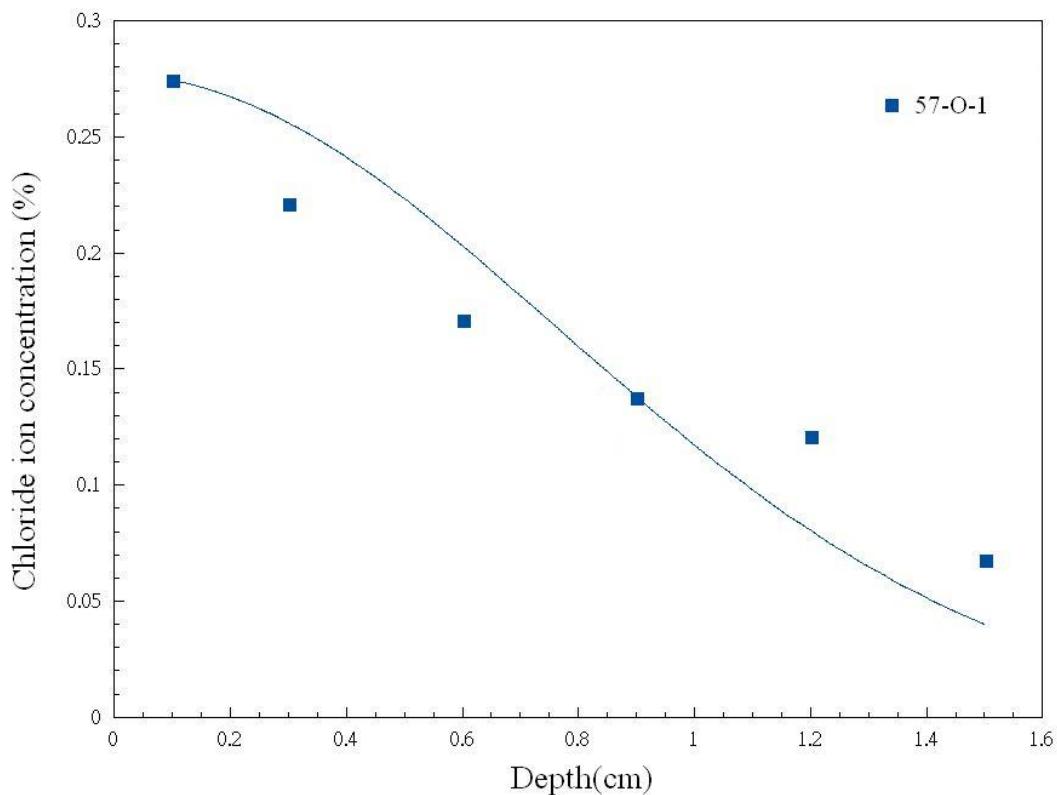


圖 4-37 編號 57-O-1 氯離子含量與深度之關係圖

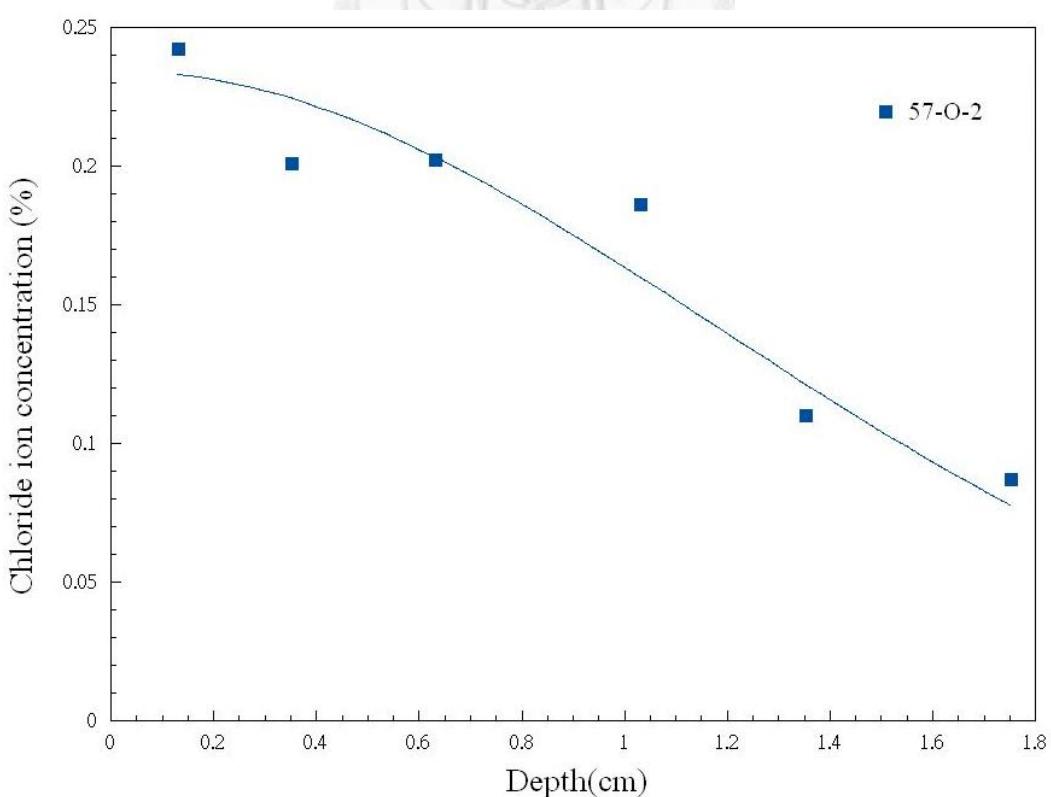


圖 4-38 編號 57-O-2 氯離子含量與深度之關係圖

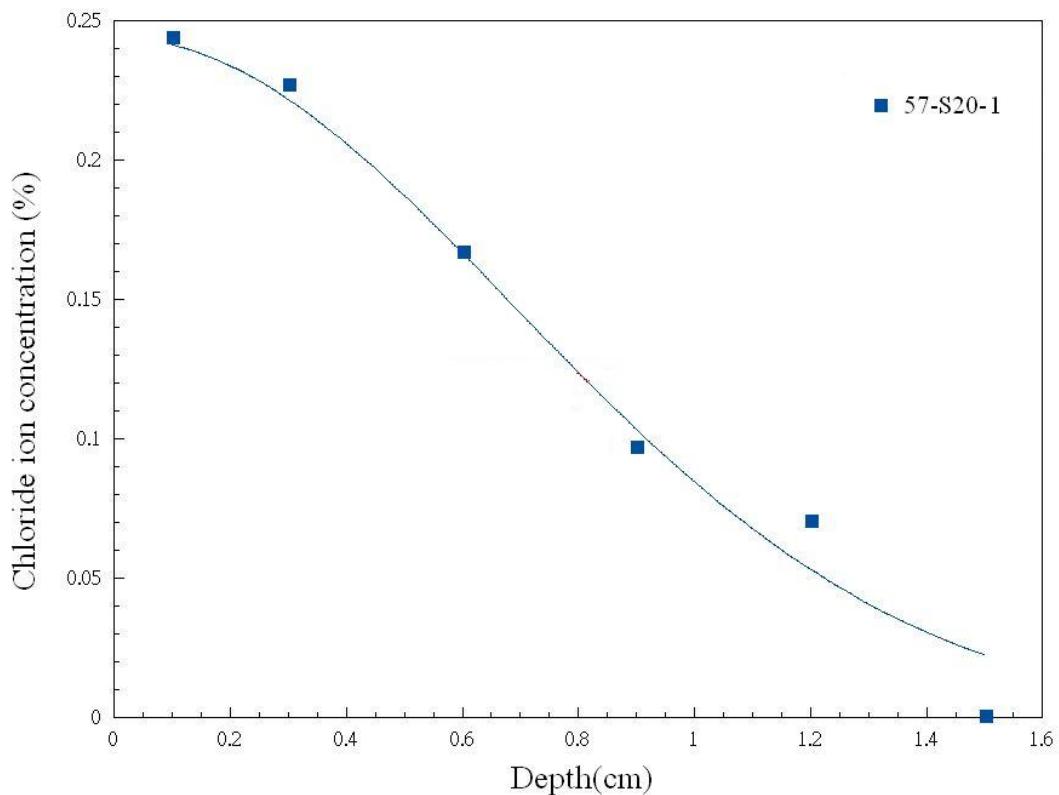


圖 4-39 編號 57-S20-1 氯離子含量與深度之關係圖

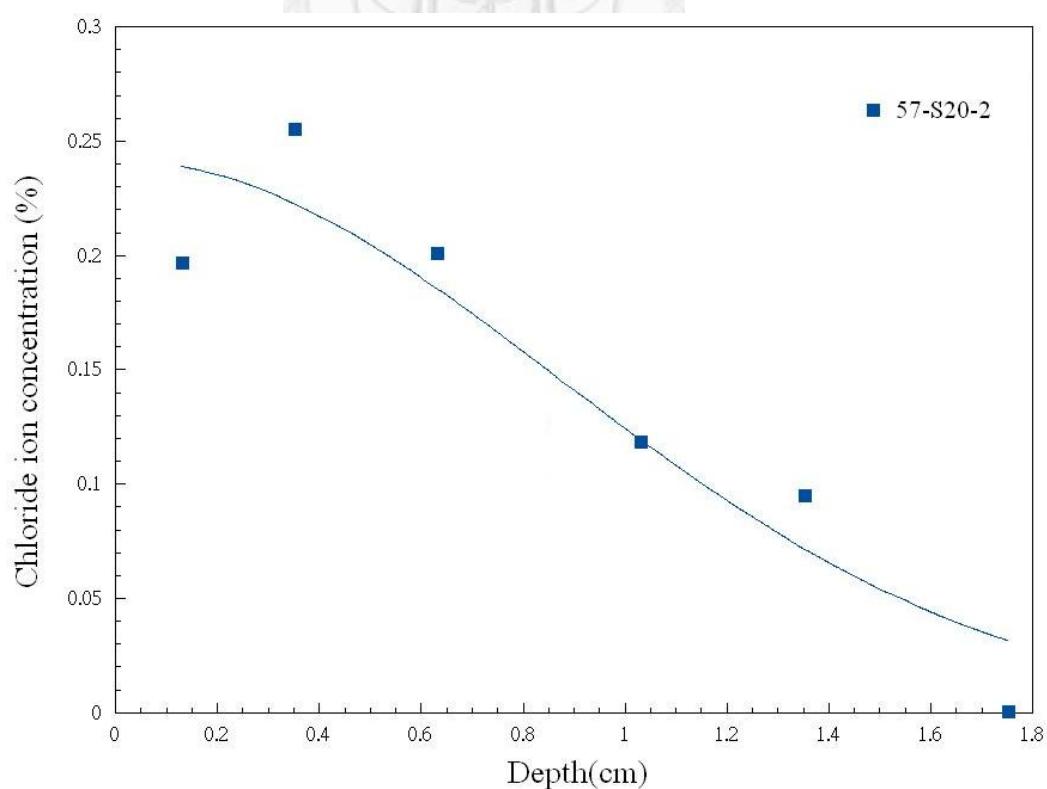


圖 4-40 編號 57-S20-2 氯離子含量與深度之關係圖

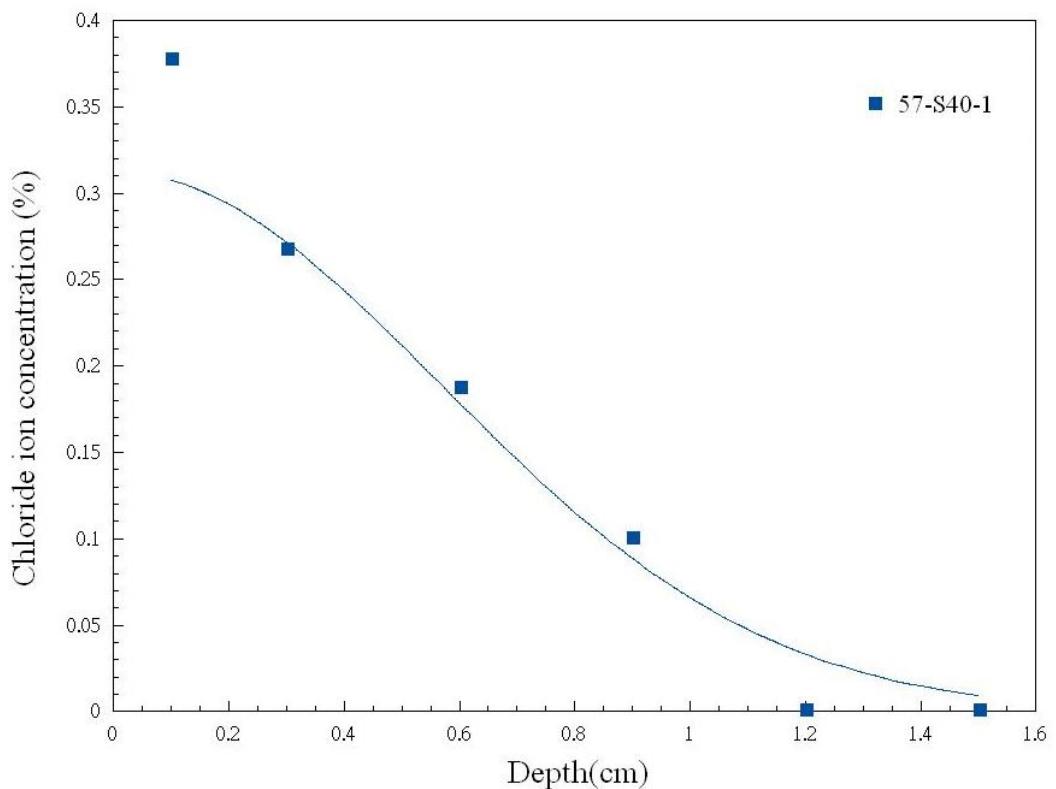


圖 4-41 編號 57-S40-1 氯離子含量與深度之關係圖

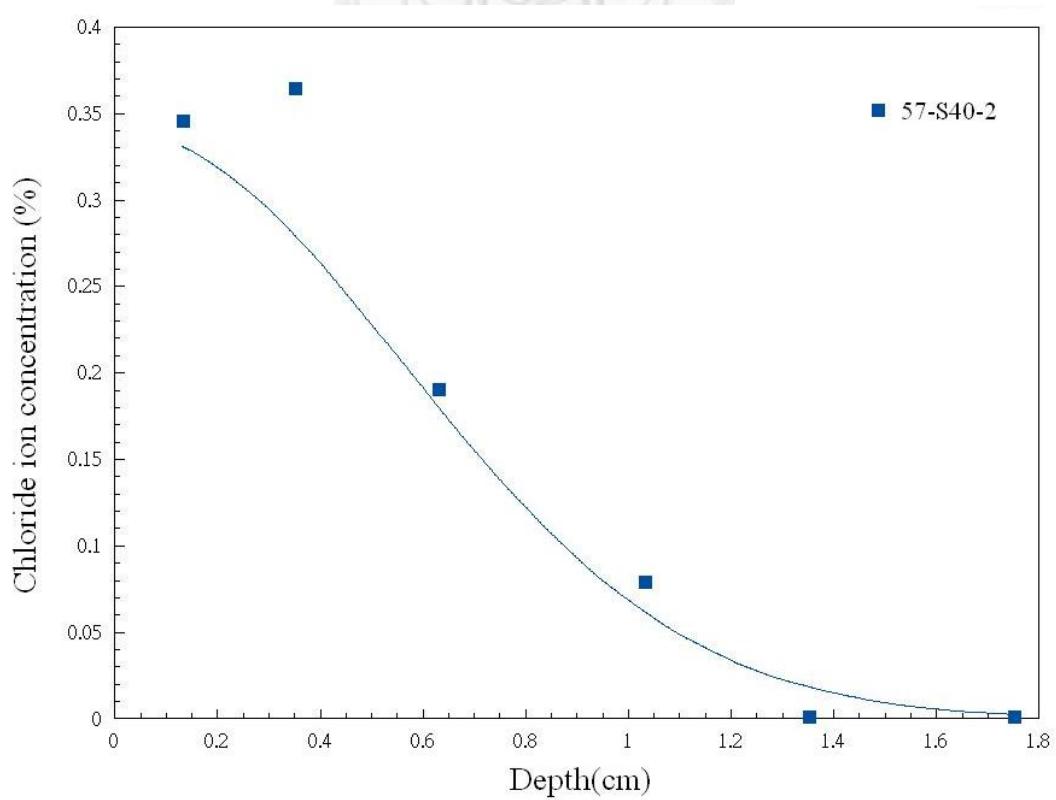


圖 4-42 編號 57-S40-2 氯離子含量與深度之關係圖

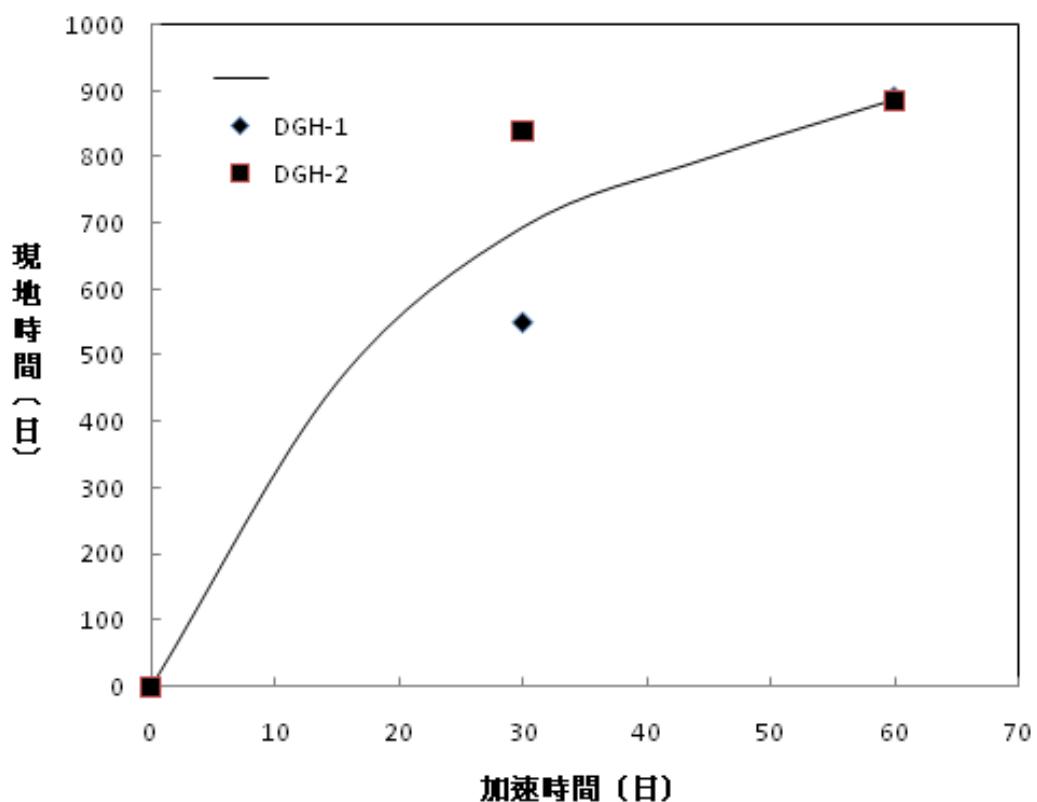


圖 4-43 加速試驗與現地試驗關係圖(DGH 組)

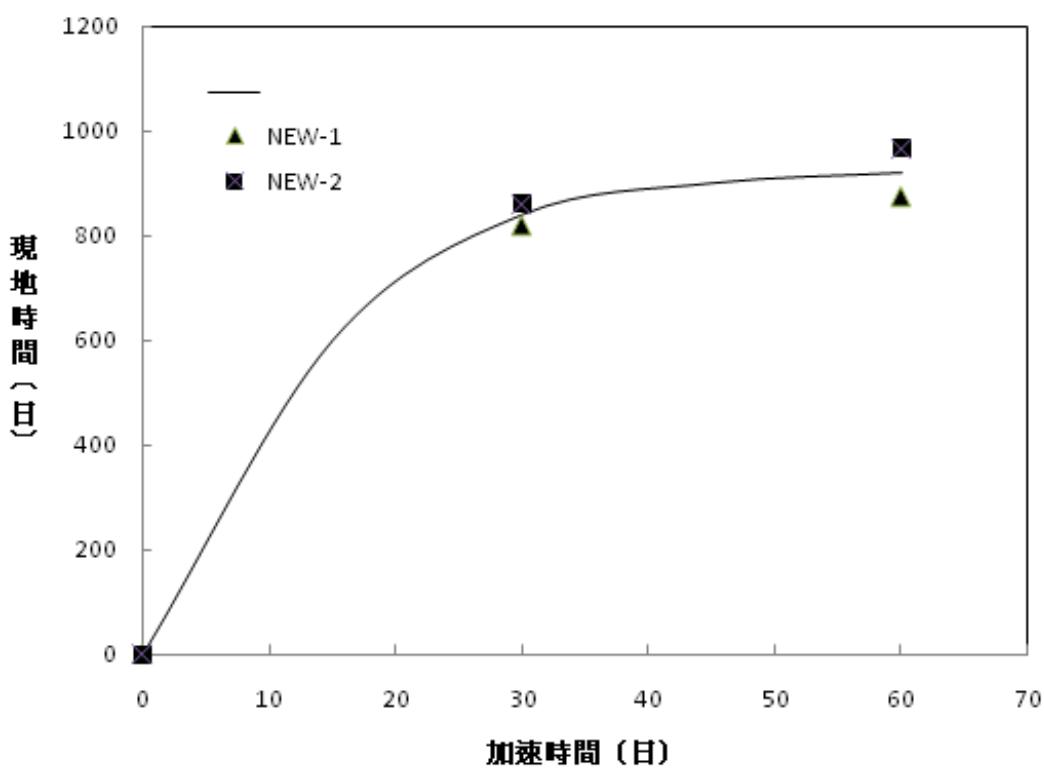


圖 4-44 加速試驗與現地試驗關係圖(NEW 組)



照片 3-1 公路局研究之鑽心試體



照片 3-2 中型單軸拌合機



照片 3-3 振動台



照片 3-4 搖篩機



照片 3-5 養護室



照片 3-6 鹽霧循環室



照片 3-7 試體切割機



照片 3-8 自動電位滴定儀



照片 3-9 混凝土鑽粉機



照片 3-10 平面砂輪機



照片 3-11 切割後混凝土試體



照片 3-12 水晶膠塗封試體



照片 3-13 置於鹽霧室試體



照片 3-14 粉末取樣及溶液



照片 3-15 試驗後之混凝土試體



照片 3-16 抽氣過濾儀器

簡歷



姓名：林德威

生日：民國 74 年 7 月 10 日

學歷：

國立臺灣大學土木工程學研究所結構工程組

2007/09~2010/07

國立臺灣大學土木工程學系

2003/09~2007/06

國立師範大學附屬高級中學 1004 班

1999/09~2003/06